HORS-SÉRIE

SCIENCES ET AVENIR

ÉTIENNE KLEIN PIERRE LASZLO

« LA PHYSIQUE ACTUELLE ÉTAIT EN GERME CHEZ LES GRECS » p. 6

EAU AIR TERRE FEU

De l'alchimie à la chimie, une nouvelle vision du monde
p. 26

Révélations sur la structure des flammes
p. 24

De l'eau jusque dans le cœur des étoiles
p. 66

La science à la conquête des 4 éléments

N°172 OCTOBRE / NOVEMBRE 2012 - BELGIQUE 4,70 € / LUXEMBOURG 4,70 € / AUTRICHE 4,80 € / ITALIE 5 € / ALLEMAGNE 7,50 € / PORTUGAL (CONT) 5,30 € / GRÈCE 5 € / SUISSE 7,90 FS / ANTILLES-RÉUNION 4,80 € / ESPAGNE 5 € / MAROC 50 D / TUNISIE 6,0 DTU / CANADA 7,50 $ CAN / USA NY 7,50 $ US / TOM (AVION) 1200 CFP / AFRIQUE 3000 CFA

©AMMA RAPHO - BERNARD MARTINEZ - BRIDGEMAN ART LIBRARY - JÖRG SUNDERMAN / AFP - VO TRUNG / LOOKATSCIENCES

M 02597 - 172 H - F: 4,50 € - RD

L'OBJET du mois

www.objetdumois.com

Reconnu pour trouver et faire découvrir des produits étonnants, originaux, fonctionnels et de qualité, L'OBJET DU MOIS vous présente un modèle EXCLUSIF de la collection

LIP CLASSICS

La montre CHRONOGRAPHE Target

Audacieuse et créative, cette superbe montre chronographe Target respecte les références essentielles d'un style contemporain affirmé. Equipée d'un mouvement analogique VD54 à quartz 6 aiguilles de grande précision, d'un boîtier chromé en alliage de métaux monté sur un bracelet caoutchouc haute résistante avec fermoir gravé LIP, cette montre puise son inspiration dans les codes de l'homme moderne.

- Compteur central pour décompte des secondes
- Compteur gauche pour affichage des minutes
- **Compteur droit** pour indiquer les heures sur 24H
- Verre minéral de protection
- Ø cadran : 37 mm
- **Garantie 2 ans**

Frais d'envoi OFFERTS

49€ SEULEMENT

Éco-participation 0,01€ inclus

T180-10050

POUR COMMANDER : L'OBJET DU MOIS 01.40.26.86.10 www.objetdumois.com

BON DE COMMANDE

A renvoyer avec votre règlement sous l'enveloppe affranchie à : L'OBJET DU MOIS - 18, rue Couste - 94230 CACHAN

L'OBJET du mois www.objetdumois.com

La montre chronographe TARGET	Référence	Qté	Prix	TOTAL
	T180-10050		49€	€
FRAIS D'ENVOI			~~6,90€~~	OFFERTS
TOTAL DE MA COMMANDE				€

- Délai de livraison : 2 semaines • Offre valable en France métropolitaine.
- Dom-Tom et étranger : nous consulter.

RÈGLEMENT

❑ Je règle par CHÈQUE à l'ordre de : l'Objet du Mois

❑ Je règle par CARTE BANCAIRE

N° : ⌊_⌊_⌊_⌊_ ⌊_⌊_⌊_⌊_ ⌊_⌊_⌊_⌊_ ⌊_⌊_⌊_⌊_

Notez les 3 chiffres du cryptogramme au dos de votre carte : ⌊_⌊_⌊_

Date d'expiration : ⌊_⌊_⌊_⌊_

Signature obligatoire :

ADRESSE DE LIVRAISON

Nom : _____ Prénom : _____

Adresse : _____

Code Postal : ⌊_⌊_⌊_⌊_⌊_ Ville : _____

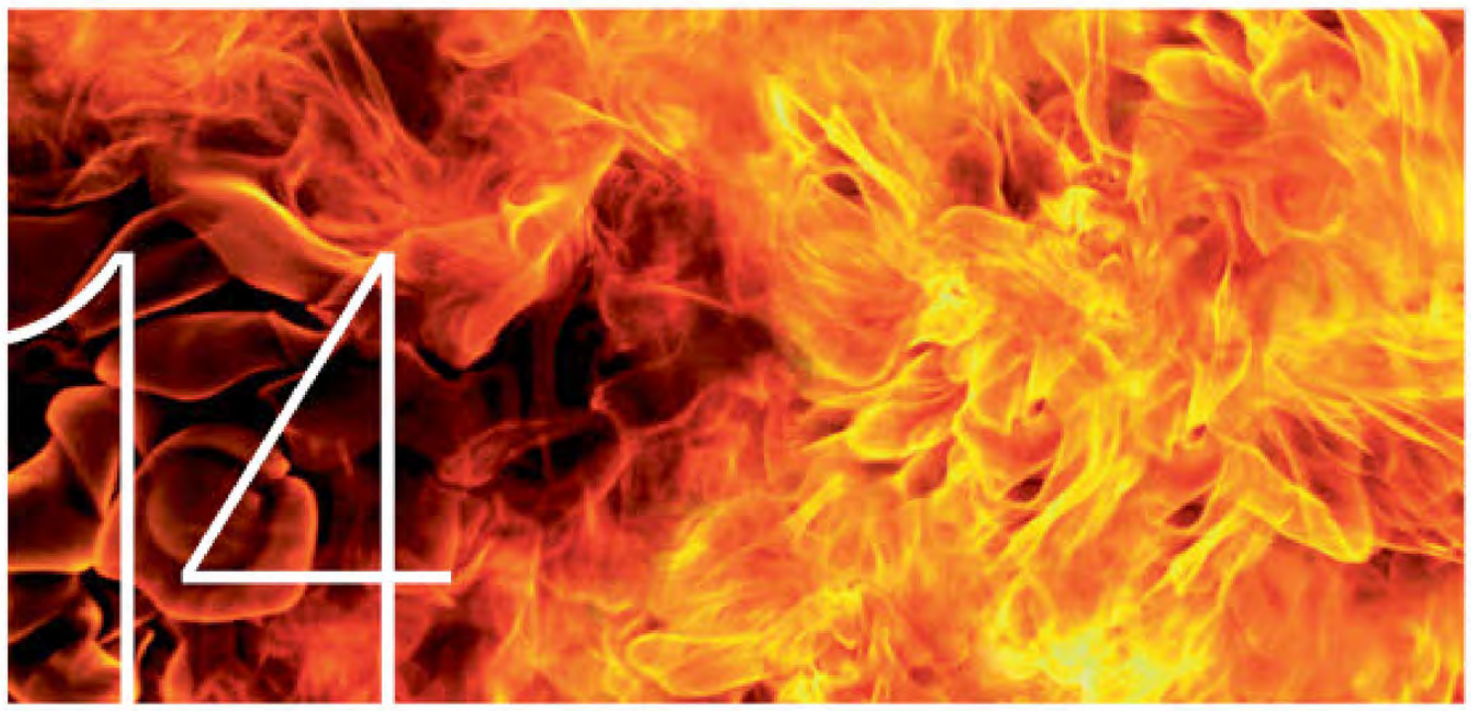
En indiquant mon adresse email ci-dessous, je serai informé(e) des offres commerciales de l'Objet du Mois et de ses partenaires :

_____ @ _____

172HB-AU
E1

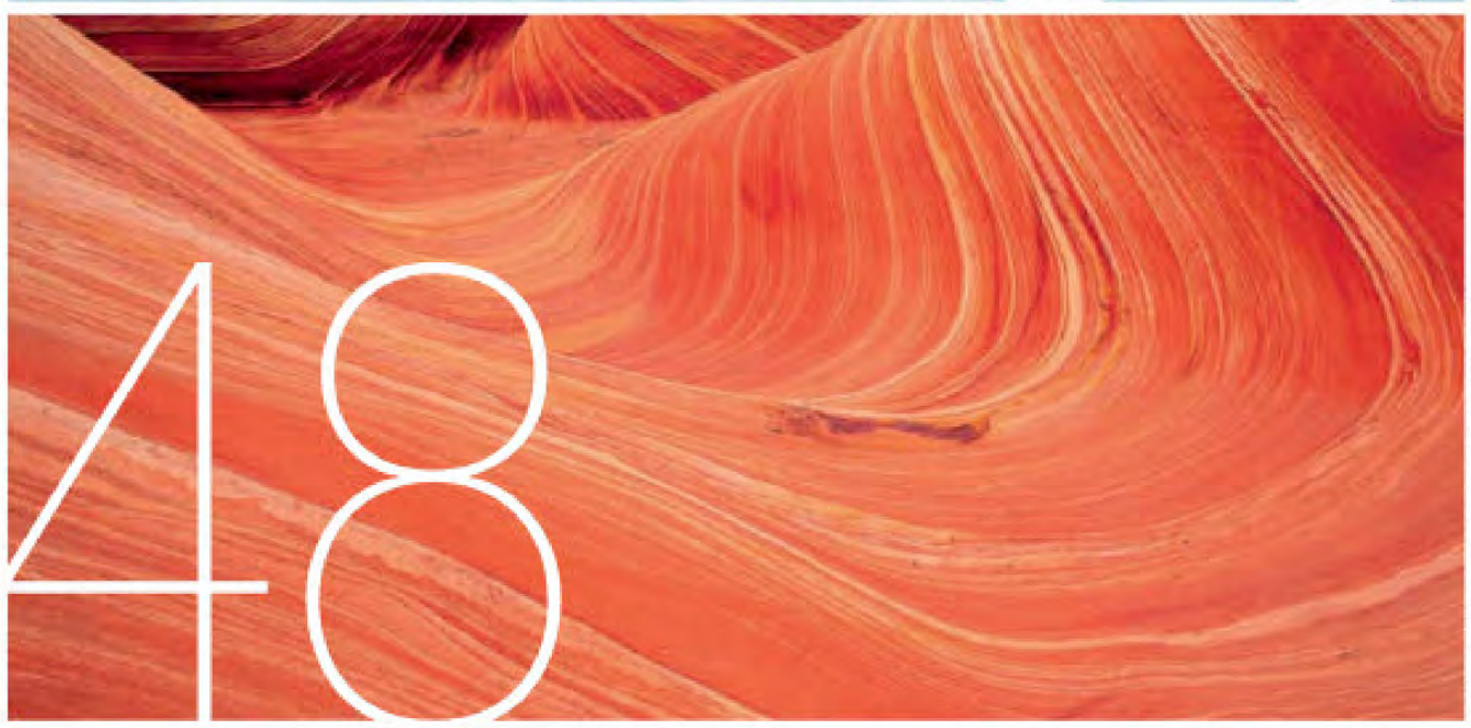
Conformément à la loi Informatique et Libertés du 06/01/1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant.

Sommaire



MICHAEL PELUCKER / BIOSPHOTO / IMAGEBROKER

TIM GRAHAM / GETTY IMAGES



ADAM JONES / IMAGESTATE / HOA-QUI / GAMMA RAPHO

GIORGIO LOTTI / IMAGESTATE / HOA-QUI / GAMMA RAPHO

5 **ÉDITO**
Elémentaire !

6
RENCONTRE
Etienne Klein, Pierre Laszlo : « Tout ce qui fait la physique était déjà en germe chez les Grecs »

11 **REPÈRES**
Un, quatre, cinq, douze…

12 **INFOGRAPHIE**
Des quatre éléments aux particules élémentaires

Feu

16 Reportage : La fusion nucléaire, un rêve en chantier

20 Vagues de chaleur autour du Soleil

23 De l'électricité dans le gaz

26 SCIENCES ET MYTHES
Le phlogistique, du feu fixé dans la matière

Air

32 Reportage : Une grosse bouffée de molécules

37 Des gouttelettes issues des profondeurs du Cosmos

39 Du choc des terres jaillit l'oxygène

42 **INFOGRAPHIE**
La biosphère sous influences

44 SCIENCES ET MYTHES
L'éther fut tour à tour l'air, l'espace, le vide…

Terre

50 Reportage : Des diamants pour explorer le centre de la Terre

57 Des planètes habitables par milliards

59 Roches, plantes et vers, tous solidaires !

60 SCIENCES ET MYTHES
L'inframonde, lieu où la mort se mue en vie

Eau

66 Reportage : Le lointain écho des sources célestes

70 Elle se met dans de drôles d'états

74 Micropolluants : à boire et à manger

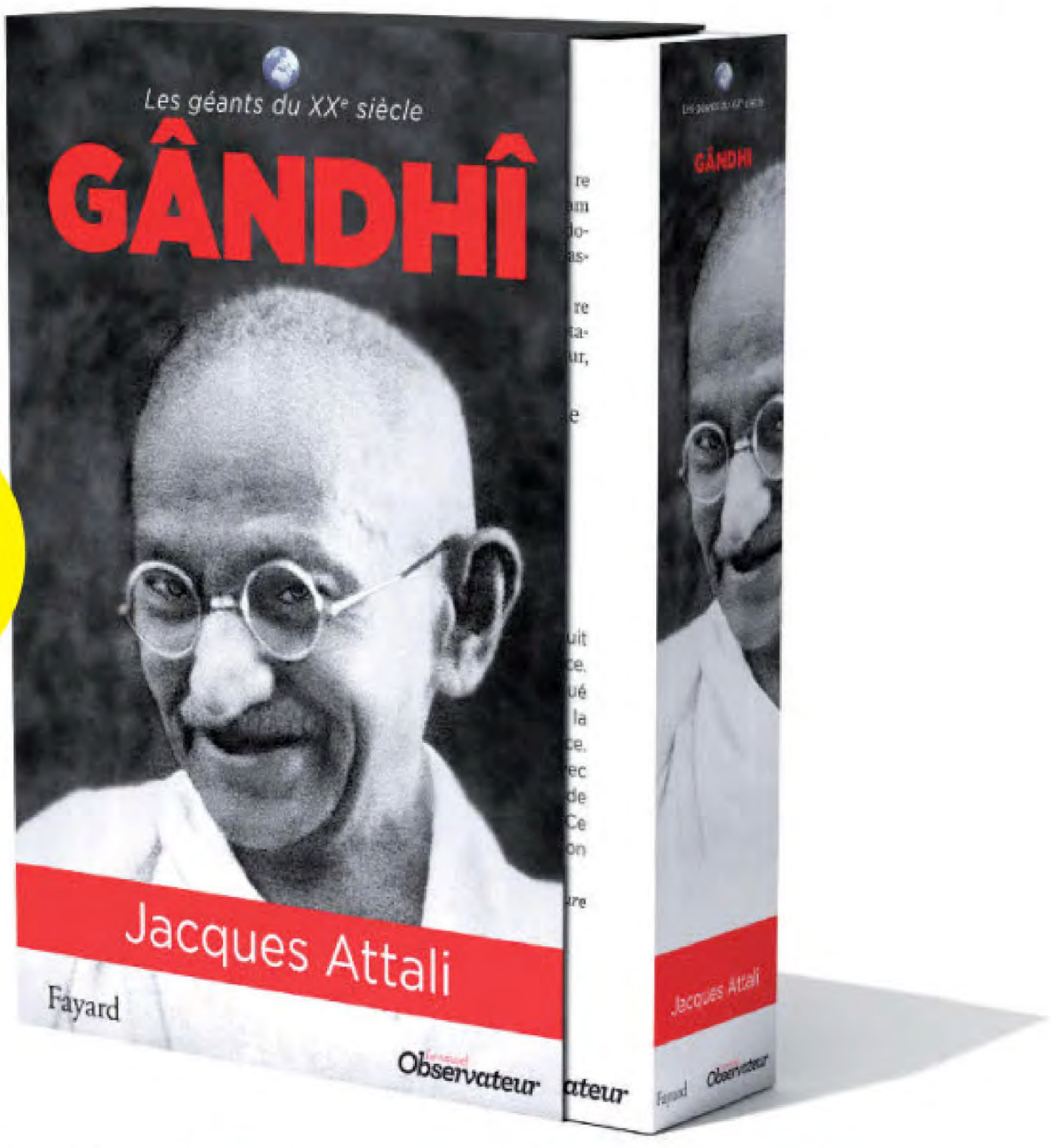
76 SCIENCES ET MYTHES
Un chaos généré par le mélange des eaux

80 **DVD, LIVRES**

Le nouvel **Observateur** et les éditions Fayard présentent

LES GÉANTS DU XX^e SIÈCLE

Une collection des meilleures biographies dirigée par Laurent Joffrin



4€90
PRIX DE LANCEMENT

Dans nos points de ventes habituels

N°1 GANDHI
par Jacques Attali

avec radio classique

Visuels non contractuels © Dominique Pasquet

HORS-SÉRIE
SCIENCES ET AVENIR

33, rue Vivienne 75083 Paris cedex 02
Tél. : 01.55.35.56.00.
Fax : 01.55.35.56.04.
redaction@sciences-et-avenir.com

Directrice de la rédaction
Dominique LEGLU 56.02
Rédactrice en chef Aline KINER (assistée de Vincent REA pour ce numéro) 56.42
Secrétaire de rédaction Florence LEROY 56.36
Directeur artistique Jean-Louis GILABERT 56.28
Photo-iconographie Andreina DE BEI (rédactrice en chef adjointe) 56.31
Isabelle TIRANT 56.32
Documentation Astrid SAINT AUGUSTE 56.48
Illustration Betty LAFON 56.37
Photogravure Karine HUET 56.25
Collaborateurs Bernadette ARNAUD, Loïc CHAUVEAU, Azar KHALATBARI, Cécile MICHAUT, Rachel MULOT, Sylvie ROUAT
Ont collaboré à ce numéro : Mehdi BENYEZZAR, Yves BLANC, Sylvie BRIET, Stéphane DAMANT, Clara DELPAS, François FOLLIET, Jean-François HAÏT, Philippe PAJOT, Pascale PISANI, Julien TIRABY
Renseignements aux lecteurs, vente au numéro
Isabelle RUDI-HOUET 01.55.35.56.50/56.30.
courrier-lecteurs@sciences-et-avenir.com
Informatique : Daniel de la REBERDIÈRE 56.06
Gestion : Agnès LE BOUCHER 56.16
Comptabilité Nathalie TREHIN 56.12, Tania MINISTRO 56.14
Assistante de direction Valérie PELLETIER 56.01

Abonnements :
01.40.26.86.11
142, rue Montmartre, 75002 Paris

Publicité Médiaobs
44 rue Notre-Dame-des Victoires 75002 Paris
Tél. : 01.44.88.97.70 / Fax : 01.44.88.97.79
Pour joindre votre correspondant par téléphone, composez le 01.44.88 suivi des 4 chiffres qui figurent à la suite de son nom ; pour adresser un email à votre correspondant, l'initiale de son prénom puis son nom suivi de @mediaobs.com.
Directrice générale Corinne ROUGÉ 93.70 assistée de Julie CABRERA 93.70
Directeur de publicité Frédéric ARNOULD 97.75
Responsable Internet Arthur VOJVODA 93. 76
Assistante commerciale Camille CANON DUPLOUIS 39.75
Exécution Nicolas NIRO 89.26
Administration des ventes Caroline HAHN 97.58
Ventes : Directeur commercial
Jean-Claude ROSSIGNOL 01.44.88.35.40
Directrice commerciale adjointe
Paule COUDERAT 01.44.88.34.55
Directeur des ventes Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Philippe MENAT 01.44.88.35.02 assisté de Lina QUACH 34.54
Relations extérieures
France ROQUE 01.44.88.35.79
Sciences et Avenir SARL
Gérance : Claude PERDRIEL
Directeur de la publication : Claude PERDRIEL
Vente au numéro, **33, rue Vivienne, 75002 Paris.** Tél. : 01.55.35.56.00. Fax 01.55.35.56.04. Les abonnements et réabonnements doivent être adressés à Sciences et Avenir, Service abonnements, 142, rue Montmartre, 75002 Paris. Tél. : 01.40.26.86.11. Tarif des abonnements : France, 1 an simple (12 numéros) : 35 €. 1 an complet (12 numéros + 4 hors-série) : 48 €. Tarifs pour les pays étrangers sur demande.
Multimédia : ID OBS, 10-12, place de la Bourse, 75002 Paris. Tél : 01.44.88.34.34.
Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement.
Copyright Sciences et Avenir.
Commission paritaire n° 55491.
Distribué par NMPP.
Photogravure :
PCH, 10 -12, place de la Bourse 75002.
Dépôt légal : 562. Imprimerie : Sego, Taverny.
Printed in France.

Édito

CATERS NEWS AGENCY/SIPA

Élémentaire !

Voir l'invisible. Apprivoiser les forces du feu. Décrypter les bizarreries de l'eau, les voyages fantasques de l'air, les fractales de la Terre… C'est avec des yeux émerveillés que nous avons décidé de vous faire redécouvrir les fameux quatre éléments qui ont présidé à la naissance, dans l'Antiquité, de l'esprit de rationalité *(lire la Rencontre avec Etienne Klein et Pierre Lazslo pp. 6-10)*. En cette époque moderne d'extraordinaires avancées scientifiques – la dernière en date est la mise en évidence du boson de Higgs dans le grand collisionneur LHC à Genève *(lire* Sciences et Avenir *n° 786, août 2012)*, nous nous sommes accoutumés à côtoyer les atomes, les quarks, les gluons, voire tout un petit peuple étrange de cordes vibrantes. Mais ce monde quantique, surgi d'équations et d'expériences de laboratoire, prend un malin plaisir à demeurer largement mystérieux. A peine se dévoile-t-il dans des images à l'esthétique éblouissante – flèches éclatées des trajets de particules, éventails arc-en-ciel de nos neurones électrisés, spirales pixellisées des ouragans tropicaux… – que nous nous interrogeons : que nous dit cette abstraction du monde qui nous entoure ?

Dans notre vie de tous les jours, à la manière des Anciens, ce sont encore les vieux mots que nous avons à la bouche. Nous regardons tomber l'eau du ciel, sourdre celle des sources et couler la rivière. Y guettant le reflet des nuages ou des montagnes, nous pensons rarement à H_2O… Pourtant, voudrions-nous y détecter quelque pollution malvenue, et voilà qu'il nous faudra appeler un chat un chat – ou plutôt, une molécule une molécule *(lire pp. 70-75)*. La chimie pointe son museau.

Notre monde de mesures et de dénominations savantes peut sembler débordé par le réel. Ce sont les images de grands incendies ravageant forêts et garrigues, ou bien de tours rendues infernales, qui continuent de nous ensorceler – ou de nous mortifier *(lire pp. 20-25)*. Le cinéma, depuis longtemps, s'en est emparé, pour qui le feu est (re) devenu un diable, tentateur et fatal. Icare s'était brûlé les ailes en s'approchant de celui du soleil, Prométhée l'avait volé pour les humains. Que dire alors de celui que l'on désire aujourd'hui capturer dans un grand tokamak *(lire pp. 16-19)*, avec la promesse de faire fusionner des particules ? Tel un fantôme hypnotisant, son plasma fait miroiter une énergie pour l'éternité. La technologie de pointe n'a-t-elle pas la fascination du mirage ?

La bouche rouge des volcans, les vents dantesques qui tourbillonnent sur les planètes géantes, les colères de notre stratosphère, l'eau qui virevolte au cœur des étoiles, la terre qui se mue en cristal aux grandes profondeurs – de tout cela, la science s'est emparée. Pour dévoiler leurs secrets, elle déploie ses antennes astronomiques, ses sondes interplanétaires, ses caméras par satellite, ses foreuses à tête de diamant. Et contrairement à l'alchimie au savoir occulté, elle s'efforce de raconter à tous l'infiniment caché de notre monde.

DOMINIQUE LEGLU, DIRECTRICE DE LA RÉDACTION

Étienne Klein, physicien et philosophe des sciences
Pierre Laszlo, chimiste

« Éléments, particules : la physique actuelle était en germe chez les Grecs »

Et si l'Univers n'était constitué que d'un seul élément ? Les chercheurs renouent aujourd'hui avec cette intuition des premiers « scientifiques ».

Dans l'Antiquité apparaît, pour expliquer le monde, la notion des quatre éléments – eau, air, terre, feu. D'où vient-elle ?

Etienne Klein. La pensée présocratique est loin de former un ensemble homogène, fût-ce sous le signe équivoque de l'aurore. Mais dès le commencement de la philosophie se décline l'affirmation que « tout est un », l'idée qu'il existe, au fin fond du réel, un principe fondamental ou une substance primordiale d'où l'on pourrait tirer la variété des choses. Thalès de Milet (v. 624 – v. 548 av. J.-C.) a la réputation d'avoir inauguré ce parti pris : il a été le premier à considérer qu'une seule substance, l'eau, était le fondement matériel à partir duquel s'épanouit le monde. Une phrase de Nietzsche dans *La Naissance de la philosophie à l'époque de la tragédie grecque* résume l'enjeu : *« Thalès a vu l'unité de l'Être et quand il a voulu la dire, il a parlé de l'eau. »* Thalès et ses disciples, les Milésiens, rompent ainsi avec l'habitude consistant à multiplier les causes et les explications arbitraires. Certes, ils continuent d'évoquer l'idée du divin dans leurs cosmologies (aux yeux de Thalès, *« tout est plein de dieux »*, rapporte Aristote), mais elle ne joue aucun rôle dans leurs explications. En somme, lorsqu'ils veulent comprendre le monde, ils décident de laisser les dieux à la porte. Par exemple, pour rendre compte des tremblements de terre, Thalès ne fait nullement appel à Poséidon, ni à aucune autre divinité, mais il propose une explication naturaliste : la terre flotte sur des eaux qui la soutiennent ; lorsqu'elles s'agitent, la terre est ébranlée, et un séisme s'ensuit… Evidemment, Thalès se trompe, mais l'important est qu'il ne concentre pas son attention sur tel ou tel tremblement de terre, mais sur les tremblements de terre *en général*. Autrement dit, ce qui l'intéresse, ce sont des classes de phénomènes, non des phénomènes particuliers. Un « esprit de système » se met là en place, qui n'est pas encore de la science, mais a déjà à voir avec elle.

> Empédocle, premier à proposer une synthèse des quatre éléments
>
> **Pierre Laszlo**

Après l'eau, quel élément apparaît-il ?

E. K. Une chronologie stricte serait difficile à établir et n'aurait d'ailleurs guère de sens. Ce que l'on sait, c'est qu'Anaximène (v. 585 – v. 525 av. J.-C.) a fondé une cosmogonie différente de celle de Thalès, basée sur l'idée que le principe de l'univers, c'est l'air. A peu près à la même époque, Héraclite (v. 550 – v. 480 av. J.-C.) voyait dans le feu l'élément à partir duquel expliquer tous les phénomènes. Pour Xénophane (v. 580 – v. 475 av. J.-C.), c'était plutôt la terre. En matière de principe fondamental, il y avait comme de la concurrence dans l'air… Mais d'un philosophe à celui qui le suivait, la conscience des problèmes se précisait. Par exemple, en supposant que la substance primordiale est indifférenciée, Anaximandre (v. 610 – v. 546 av. J.-C.) vint déjouer une objection à laquelle l'hypothèse aquatique de Thalès, par exemple, prêtait aisément le flanc : comment le feu, qui est l'opposé de l'eau, peut-il en être venu à être ?

Pierre Laszlo. Que le feu ait été tenu pour un élément est à rapprocher de cultes solaires du Moyen-Orient antique, voire de cultes du feu, comme en Perse aché-

ménide. Ainsi, à Héliopolis, nom grec de la ville égyptienne d'Onou, on adorait le dieu Soleil comme une trinité, Khépri, représentant le Soleil renaissant, Rê, le Soleil au zénith, Atoum, le Soleil couchant.

Historiquement, c'est Empédocle d'Agrigente (v. 490 – v. 435 av. J.-C.) qui propose la première synthèse des quatre éléments sans donner la primauté à l'un ou à l'autre. Empédocle, ce contemporain d'Hérodote, d'Epicure, d'Eschyle, de Sophocle et d'Euripide… Tous hommes du Ve siècle avant notre ère, qui fut un âge d'or pour la pensée, ce que l'on appela le miracle grec.

E. K. En effet, avant de se jeter, dit-on, dans le cratère de l'Etna pour confirmer la réputation qu'il avait d'être un dieu, Empédocle apporta un semblant de conciliation en accordant une importance équivalente aux quatre éléments. Il avait compris que le problème de tout système moniste, s'appuyant sur une entité et une seule, est de parvenir à expliquer les transitions d'une forme à une autre. En multipliant les éléments primordiaux, on s'offre une plus grande liberté de manœuvre, par toutes les combinaisons ainsi rendues possibles.

Mais pourquoi ce nombre de quatre?

P. L. Il vient de Pythagore (v. 580 – v. 495 av. J.-C.) et de son école, pour qui tout dans la nature était nombre. Empédocle, grand vulgarisateur, évoque sa conception du monde dans un poème lyrique de cinq mille vers dont il ne nous reste que des bribes. Il imagine des sphères concentriques au centre des- ●●●

Étienne Klein

Il dirige au CEA le laboratoire de Recherche sur les sciences de la matière et enseigne la philosophie des sciences à l'Ecole centrale de Paris. Parmi ses ouvrages de vulgarisation, souvent primés : *Les Secrets de la matière* (Plon, 2008), *Il était sept fois la révolution* (Flammarion, 2008), *Le facteur Temps ne sonne jamais deux fois* (Flammarion, 2009), *Le Small Bang des nanotechnologies* (Odile Jacob, 2011).

●●● quelles on trouve l'eau comprimée par la terre, puis le feu entouré par l'air. Ce *sphairos* n'est pas statique, mais dynamique et fluctuant. Car ces sphères concentriques sont constamment travaillées par les forces antagonistes que sont l'Amour et la Haine. La notion d'attraction et de répulsion, fondamentale pour la pensée scientifique occidentale, apparaît donc déjà chez ce savant de l'Antiquité.

E. K. En effet, on peut tracer des lignes conceptuelles qui nous relient à Empédocle, puisqu'il parle d'éléments interagissant entre eux. Mais bien sûr, les constituants que nous croyons fondamentaux ne sont plus ni l'eau, ni l'air, ni la terre, ni le feu : ce sont six quarks et six leptons, les briques du modèle standard de la physique des particules *(lire p. 11)*. Et ce ne sont plus l'amour et la haine qui les font interagir, mais quatre interactions jugées fondamentales : les forces gravitationnelle et électromagnétique, et deux forces nucléaires, l'une faible, l'autre forte. Précisons que les penseurs dont nous parlons n'ont évidemment pas « inventé » l'air, l'eau, la terre et le feu : leur originalité n'est pas d'avoir identifié ces éléments, mais d'avoir considéré qu'ils étaient à la base de tout.

P. L. Alors que d'autres peuples comme les Mésopotamiens – que ce soit à Babylone ou à Sumer – ne les utilisent que pour faire une description du monde, et les intègrent dans leurs épopées mythologiques, les Grecs, eux, y recourent pour chercher à comprendre le monde de façon rationnelle.

E. K. Là s'expriment trois idées qui se révèleront fondamentales. D'abord, on pose la question de la cause matérielle de toute chose. Ensuite, on exige que cette question soit résolue sans recours aux mythes, aux fables ou à des dieux *ad hoc*. Enfin, on postule qu'il doit être possible de réduire toute chose à une ou plusieurs entités fondamentales.

P. L. Parmi les penseurs grecs, il faut aussi parler d'Aristote (384 – 322 av. J.-C.), qui nous a fait parvenir le message des présocratiques. C'est grâce à lui que la notion des quatre éléments perdure au Moyen Age, adoptée par les théologiens de l'époque.

E. K. Dans son *Traité du Ciel*, il reprend cette quaternité à laquelle il ajoute un cinquième élément, la « quintessence », que les scolastiques (1) appelleront « premier corps » ou « éther ». Du coup, pour Aristote, il y a deux mondes : le monde sublunaire, celui des quatre éléments, qui interagissent entre eux et se dégradent, et le monde supralunaire, formé d'un seul élément, la quintessence, qui est inaltérable. Il faudra attendre Galilée (1564-1642) pour que les mondes terrestre et céleste s'unifient en un seul et même « uni-vers » *(lire pp. 44-47)*.

Les Grecs ont également inventé la notion d'atomes. Comment s'articule-t-elle avec celle des quatre éléments ?

E. K. C'est une théorie concurrente, qui s'appuie sur ce que le philosophe des sciences Gaston Bachelard, disparu il y a cinquante ans cette année, appelait une *« métaphysique de la poussière »*.

P. L. L'atome, défini comme une particule matérielle, indivisible, insécable, apparaît en même temps que l'élément, avec Leucippe (v. 460 – 370 av. J.-C.) et son contemporain Démocrite.

E. K. Pour eux, les atomes sont invisibles, et ce sont leurs diverses agrégations qui permettent de fabriquer les choses que nous pouvons voir. Il y a là l'idée que des entités invisibles structurent secrètement le monde visible.

P. L. Tout ce qui fait la physique d'aujourd'hui est déjà en germe au v[e] siècle av. J.-C., avec ces deux notions d'éléments et de particules ultimes de la matière.

> Quatre interactions ont remplacé les forces d'Amour et de Haine
>
> **Étienne Klein**

E. K. L'atomisme suppose l'existence du vide : *« Le vide n'existe pas moins que les corps »*, explique Leucippe. Les atomistes justifient son existence par le constat de la possibilité du mouvement : comment un corps pourrait-il se déplacer ailleurs si cet « ailleurs » n'était pas vide ? Le vide se confond ici avec ce que nous appelons aujourd'hui l'espace : c'est un réceptacle, une pure extension capable de recevoir les corps. Aristote va contester cette conception. Il considère, lui, qu'un mouvement ne perdure que tant qu'agissent les forces qui s'exercent sur le mobile : si la pierre qui a quitté la main du lanceur poursuit son mouvement, c'est parce que l'air qu'elle a déplacé vient se glisser derrière elle et la propulse. En d'autres termes, la présence d'un certain milieu est nécessaire au mouvement. Voilà pourquoi Aristote nie le vide, contre les atomistes. De l'Antiquité au Moyen Age, l'Occident va répéter ses arguments, jusqu'à aboutir à la fameuse formule de Roger Bacon (1214-1294) : *« La nature a horreur du vide. »* Cette horreur du vide finira même par être considérée comme une véritable force. Au Moyen Age, on croyait savoir (à tort) que l'eau, comme tous les autres corps, se contracte quand elle devient solide. On interprétait donc le fait qu'une bouteille d'eau se casse sous l'effet du gel en disant que la nature brise la bouteille plutôt que de laisser se former un vide…

Le vide, un véritable repoussoir…

E. K. Oui, mais l'atomisme n'a jamais complètement disparu. Par exemple, Giordano Bruno (1548-1600) était atomiste, tout comme Galilée. Mais ceux qui défendaient cette thèse étaient la cible de l'Inquisition.

Pourquoi ?

E. K. A cause du dogme de l'Eucharistie, établi par le concile de Trente (1545-1563), qui postule que le pain, tout en conservant les apparences et les propriétés physiques du pain, devient réellement le corps du Christ lors de la consécration. Il implique donc une rupture exceptionnelle du lien entre la substance (qui change) et ses propriétés (qui ne changent pas). Or ce dogme est ininterprétable dans le cadre de l'atomisme : pour qui croit à l'atome, si un morceau de pain conti-

Pierre Laszlo
Professeur honoraire de chimie organique à l'Ecole polytechnique et à l'université de Liège, il a également enseigné aux Etats-Unis. Il se consacre désormais à la vulgarisation. Parmi ses ouvrages, qui ont reçu de nombreux prix : *Terre & eau, air & feu*, 2009, *Copal, Benjoin, Colophane… Histoire de science*, 2007, *Drôle de chimie!*, 2011, tous publiés aux éditions Le Pommier.

nue d'avoir une apparence de morceau de pain, c'est qu'il demeure constitué d'atomes de pain…

A partir de quand sait-on que l'eau se décompose elle-même en éléments plus fondamentaux?

P. L. Avec Lavoisier (1743-1794 ; *lire aussi pp. 26-29*). La contribution de cet expérimentateur est essentielle dans l'histoire de la pensée, car il parvient à montrer que l'eau est un corps composé de deux corps simples : l'hydrogène et l'oxygène. Il en fait l'analyse par décomposition puis en réalise la synthèse en combinant l'oxygène et l'hydrogène.

Comment lui en est venue l'idée?

P. L. Auparavant, il y a eu tout le travail des alchimistes, expérimentateurs qui manipulaient et transformaient la matière. Sans leur matérialisme, Lavoisier n'est pas concevable. Ils avaient déjà découvert de très nombreux éléments, peut-être le quart de ceux que recense Lavoisier. Nous leur sommes redevables d'au moins une demi-douzaine d'entre eux : l'antimoine (Thölde), le phosphore (Brand), le zinc (Paracelse), le bismuth (Basile Valentin), l'arsenic (Albert le Grand), le cobalt (Brandt)…

Les alchimistes, qui passent aujourd'hui pour de purs irrationnels…

P. L. L'alchimie était, bien au contraire, une approche rationnelle, opposée à ce stéréotype que vous évoquez. Ainsi que l'a établi Bernard Joly, professeur émérite à l'université de Lille, il n'y a pas de coupure entre alchimie et chimie. Un personnage comme Newton est un excellent exemple de cette tran- ●●●

●●● sition, aux XVII^e-XVIII^e siècles, où l'on peut être à la fois un physicien révolutionnaire et un alchimiste clandestin.

Combien d'éléments Lavoisier a-t-il identifiés ?

P. L. Une trentaine. Parmi eux, le calorique et la lumière, qui seront exclus de la liste au XIX^e siècle *(lire pp. 26-29)*. A cette époque, les scientifiques découvrent toute une volée de nouveaux éléments. Le chimiste russe Dmitri Mendeleïev les organisera, dans les années 1860, en un tableau qui en compte 60. En cela, il a été génial.

Mais il eut des prédécesseurs dans l'élaboration de ce tableau périodique des éléments. L'Allemand Johann Wolfgang Döbereiner remarquait déjà en 1829 que le sodium avait une masse atomique (2) proche de la moyenne de celles du lithium et du potassium. Une quarantaine d'années plus tard, Chancourtois, Newlands, Odling, Hinrichs, Lothar Meyer s'essayèrent à ranger les éléments par masse atomique croissante. Mendeleïev en 1869 s'inscrit dans cette double tradition : rangement des éléments depuis les légers jusqu'aux lourds, et selon leurs propriétés chimiques caractéristiques, leurs valences (3) surtout. Son tableau comporte 66 cases pour la soixantaine d'éléments alors connus, ainsi que – innovation géniale, d'une belle audace – des emplacements vides pour des éléments non encore découverts. En outre, le chimiste russe n'hésite pas à s'affranchir de la règle d'une masse atomique constamment croissante et à permuter des éléments, tels que le cobalt et le nickel, afin de constituer des familles d'éléments aux propriétés semblables.

C'est un véritable retour de balancier : avec Lavoisier, la notion d'élément résultait des seules observation et expérimentation. Mendeleïev revient aux éléments abstraits des philosophes. Son tableau périodique, il insiste sur ce point, ne se réfère pas aux produits chimiques, comme on les trouve dans la nature ou dans un laboratoire. Ainsi, alors que deux variétés allotropiques (4) étaient connues pour le carbone, graphite et diamant, Mendeleïev considère le carbone comme une entité déconnectée d'avec ses manifestations concrètes, qu'on peut qualifier d'archétype platonicien. Son tableau périodique est un monument de la pensée théorisante.

Aujourd'hui, le tableau de Mendeleïev compte combien d'éléments ?

P. L. Entre 115 et 120. L'imprécision est due au fait que certains ne sont pas encore homologués.

A quel point les découvertes du XX^e siècle sur l'infiniment petit ont-elles modifié notre vision des éléments ?

E. K. Les éléments du tableau de Mendeleïev sont appelés des atomes, mais ces atomes-là n'ont pas les propriétés que leur attribuaient les Grecs. Pour eux, l'atome était insécable – c'est d'ailleurs la signification même du mot *atomos*. Or, l'atome de la physique moderne n'est plus indivisible puisqu'il contient des particules beaucoup plus petites que lui…

P. L. Pour le chimiste que je suis, les éléments fondamentaux sont aujourd'hui le proton, le neutron et l'électron.

E. K. Pour le physicien, la division va encore plus loin, car le proton et le neutron sont eux-mêmes constitués de quarks, et ne sont donc plus élémentaires. On voit que le terme même d'élément est devenu compliqué à manier *(lire pp. 11-13)*.

Ce terme va-t-il encore évoluer avec de nouvelles théories ?

E. K. La théorie des super-cordes, qui vise à unifier la description du monde de l'infiniment petit, celui des particules élémentaires, et le monde de l'infiniment grand, celui des galaxies ou des amas de galaxies, part du principe que, si l'on pouvait regarder une particule élémentaire avec une loupe extrêmement puissante, on découvrirait qu'il s'agit non pas d'un objet ponctuel, mais d'une sorte de fil ultramicroscopique vibrant et bougeant à des vitesses vertigineuses. Et selon cette théorie, il n'y aurait pas mille et une sortes de particules élémentaires dans l'Univers : il n'y en aurait qu'une. Cette particule fondamentale serait une corde vibrante, analogue à celle d'un violon, dont les harmoniques – ses différents modes de vibration – constitueraient toutes les particules que nous connaissons, ainsi que d'autres qui n'ont pas encore été détectées. Autrement dit : toute la matière pourrait être décrite par une corde unique présentant une infinité de modes de vibration. L'unité revendiquée par les Grecs serait enfin réconciliée avec l'infinité des apparences possibles…

> « La corde, particule unique, vibrante, présentant une infinité de variations

PROPOS RECUEILLIS PAR DOMINIQUE LEGLU ET ALINE KINER

PHOTOS : BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR

1. Philosophes médiévaux qui entendent concilier philosophie d'Aristote et théologie chrétienne.
2. La masse atomique exprime la masse de l'élément en unité de masse atomique représentant un douzième de la masse du carbone.
3. Nombre maximal de liaisons qu'un élément peut former avec d'autres éléments : le fer est trivalent, l'oxygène bivalent.
4. Les atomes d'un corps simple peuvent connaître plusieurs types d'arrangements dans l'espace, plusieurs formes cristallographiques ou moléculaires.

Un, quatre, cinq, douze...

Le nombre des constituants « ultimes » de la matière n'a cessé d'osciller au fil des théories et des progrès scientifiques. Et la physique n'a toujours pas dit son dernier mot.

VIe S. AV. J.-C. : Des philosophes grecs soutiennent qu'il existe un seul élément au fondement matériel du monde. L'eau pour Thalès de Milet, l'air pour Anaximène, le feu pour Héraclite, la terre pour Xénophane… et une substance indifférenciée pour Anaximandre.

Ve S. AV. J.-C. : Dans la lignée de Pythagore, Empédocle propose une théorie énonçant quatre éléments – air, feu, terre et eau – comme principes composant toutes choses. Parallèlement, les atomistes Leucippe et Démocrite affirment que le monde est constitué d'entités invisibles et insécables : les atomes.

IVe S. AV. J.-C. : Aristote ajoute un cinquième élément, la « quintessence » ou « éther », dans laquelle baignerait le Cosmos. Ces cinq éléments traverseront plus de deux millénaires.

XIIe–XVIe SIÈCLE : L'atomisme décline, la vision aristotélicienne prévaut. Les alchimistes identifient une poignée de corps simples.

FIN XVIIIe SIÈCLE : Lavoisier isole une trentaine d'éléments.

AKG IMAGES

***L'Etre humain en équilibre entre les quatre éléments*, gravure sur bois, 1532.**

Ses expériences ébranlent la théorie des cinq éléments.

1803 : Le Britannique John Dalton « découvre » l'atome, considéré comme l'élément ultime. Mais la distinction entre élément, atome et corps simple est encore peu claire.

1869 : On atteint le nombre de 63 éléments chimiques, que le Russe Dmitri Mendeleiev classe « par affinités ». De nos jours, ce nombre est de 118 – dont 92 éléments naturels.

1897 : Le Britannique Joseph John Thomson découvre l'électron.

1911 : Le Néo-Zélandais Ernest Rutherford conclut à l'existence d'un noyau au sein de l'atome. Ce noyau révèlera sa composition quelques années plus tard, avec la découverte du proton par Rutherford et du neutron par le Britannique James Chadwick. La matière ordinaire stable, celle qui nous entoure aujourd'hui, est constituée des particules de la première famille *(voir ci-contre)*.

DEPUIS 1964 : Protons et neutrons ne sont plus élémentaires, mais composés de trois quarks. L'ensemble des composants de la matière forme douze particules élémentaires divisées en trois familles.

FIN XXe – DÉBUT XXIe S. : certains physiciens sont à la recherche d'une théorie de la gravité quantique. Parmi les candidats, la théorie des cordes qui considère les particules élémentaires comme les modes de vibration d'un seul élément : une corde ultra-microscopique.

LE MONDE EN DOUZE PARTICULES, TROIS FORCES… ET HIGGS

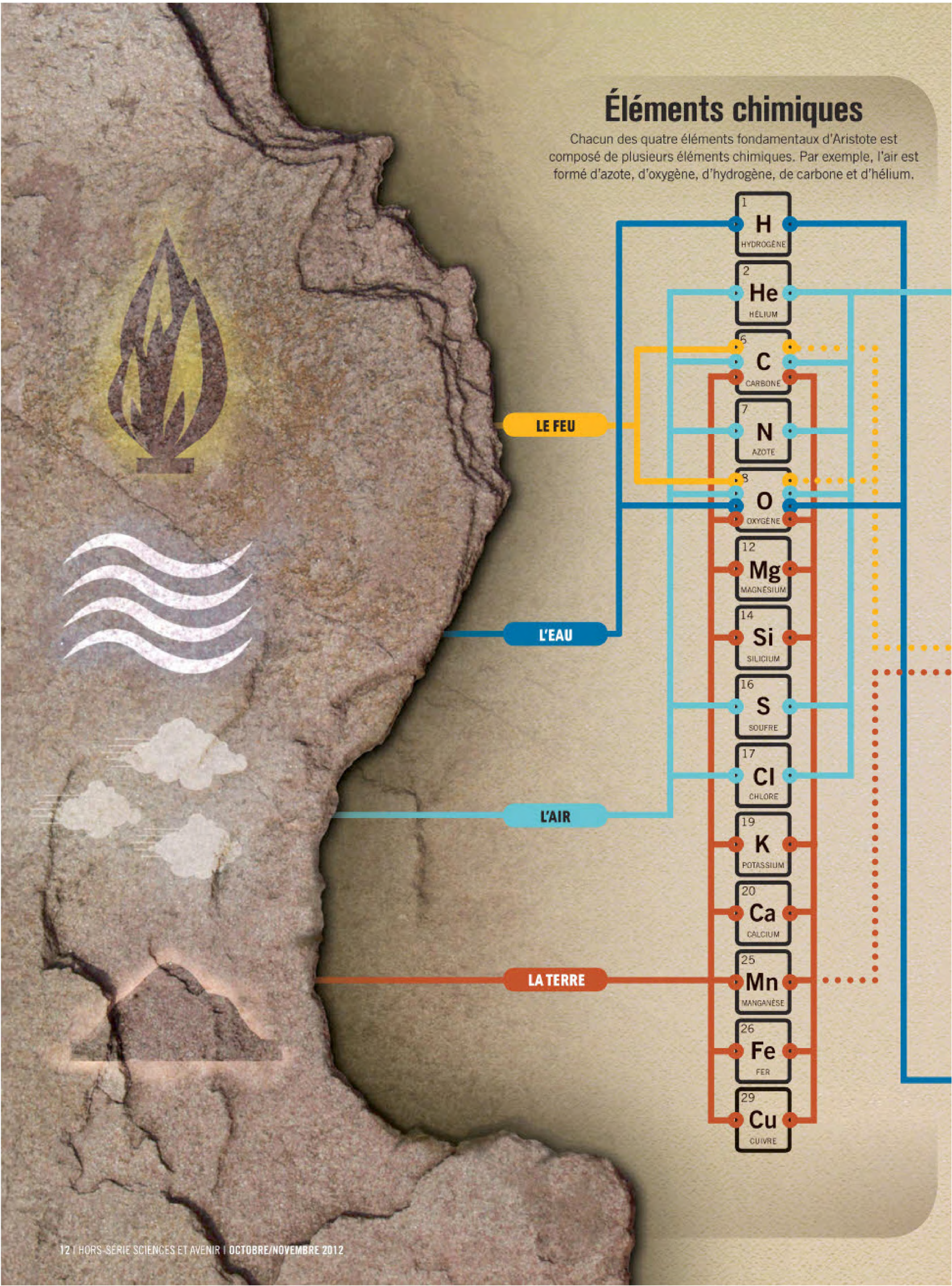
FERMIONS	1re FAMILLE	2e FAMILLE	3e FAMILLE
LEPTONS Particules de matière insensibles à l'interaction forte qui assure la cohésion des noyaux	**ÉLECTRON** Chargé négativement, il forme l'atome avec les nucléons (protons et neutrons) du noyau	**MUON** Cousin de l'électron, 200 fois plus lourd	**TAU** Autre cousin de l'électron, encore plus lourd, très instable
	NEUTRINO-ÉLECTRON Sans charge électrique, et de masse très petite, il interagit rarement avec l'environnement	**NEUTRINO-MUON** Créé en même temps qu'un muon. Propriétés semblables à celles du neutrino- électron	**NEUTRINO-TAU** Créé en même temps qu'un tau. Propriétés semblables à celles du neutrino électron
QUARKS Particules de matière, jamais solitaires	**UP.** Un proton en contient 2, un neutron 1 **DOWN** Un proton en contient 1, un neutron 2	**CHARM** Cousin du quark up, plus lourd **STRANGE** Cousin du quark down, plus lourd	**TOP** Cousin du quark up, encore plus lourd **BEAUTY** Cousin du quark down, encore plus lourd

BOSONS				
12 BOSONS de jauge assurent la transmission des forces entre les briques de matière que sont les fermions. **HIGGS** n'est pas un boson de jauge.	**PHOTON** Grain élémentaire de lumière, vecteur de la force électromagnétique. Il relie les électrons au noyau, lie les atomes dans une molécule.	**BOSONS W^+, W^-, Z^0** Vecteurs de l'interaction faible, responsables de certaines formes de désintégration radioactive.	**GLUONS** Vecteurs de l'interaction forte, qui maintient ensemble les quarks dans les protons et les neutrons, et ces derniers dans le noyau. Il en existe 8.	**HIGGS** n'a existé dans l'Univers qu'un dix-milliardième de seconde après le Big Bang. C'est lui qui a donné leur masse aux autres particules.

Dans le modèle standard, trois familles de quatre particules élémentaires constituent l'ensemble du monde. La matière ordinaire qui nous entoure est faite de particules de la première famille. Les autres (fond clair) ont peut-être existé au début du Cosmos mais n'apparaissent aujourd'hui qu'à très haute énergie, dans les accélérateurs, lors d'explosions d'étoiles ou collisions de trous noirs.

Éléments chimiques

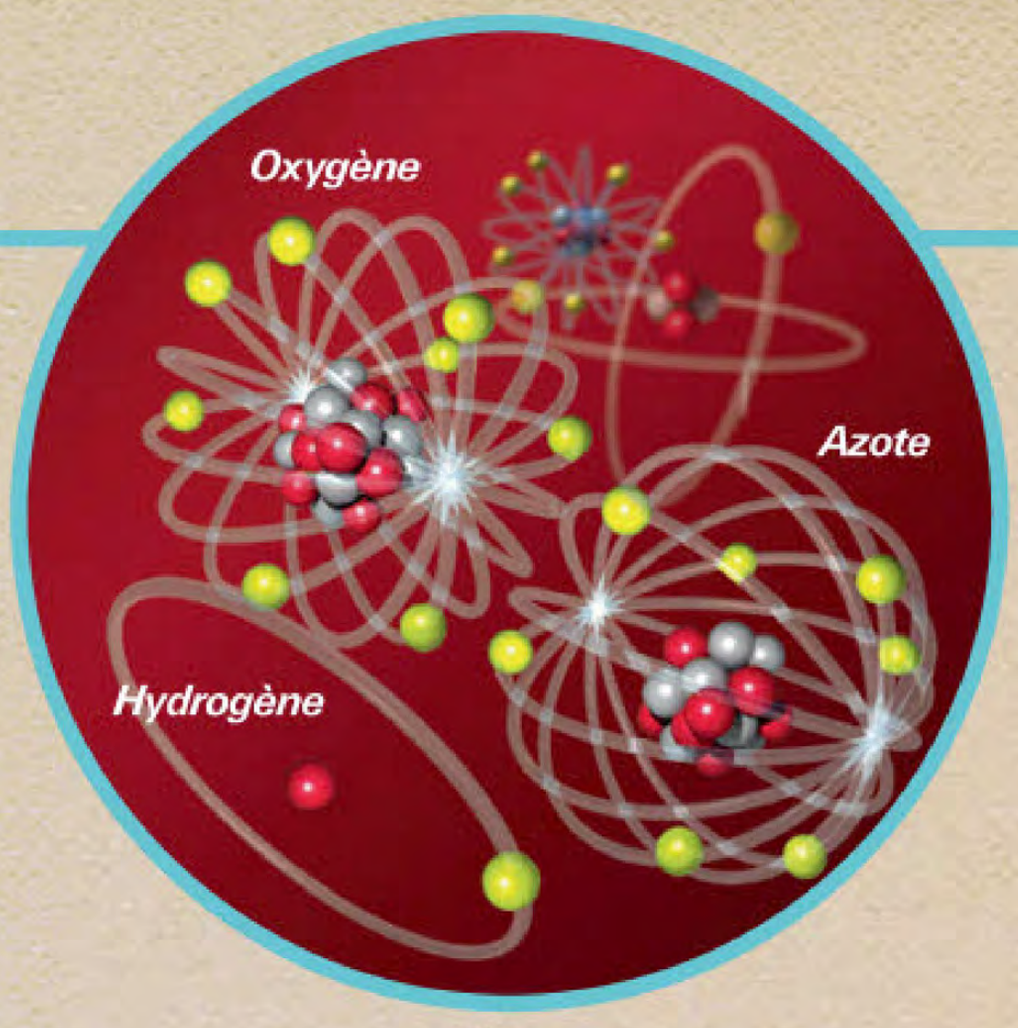
Chacun des quatre éléments fondamentaux d'Aristote est composé de plusieurs éléments chimiques. Par exemple, l'air est formé d'azote, d'oxygène, d'hydrogène, de carbone et d'hélium.



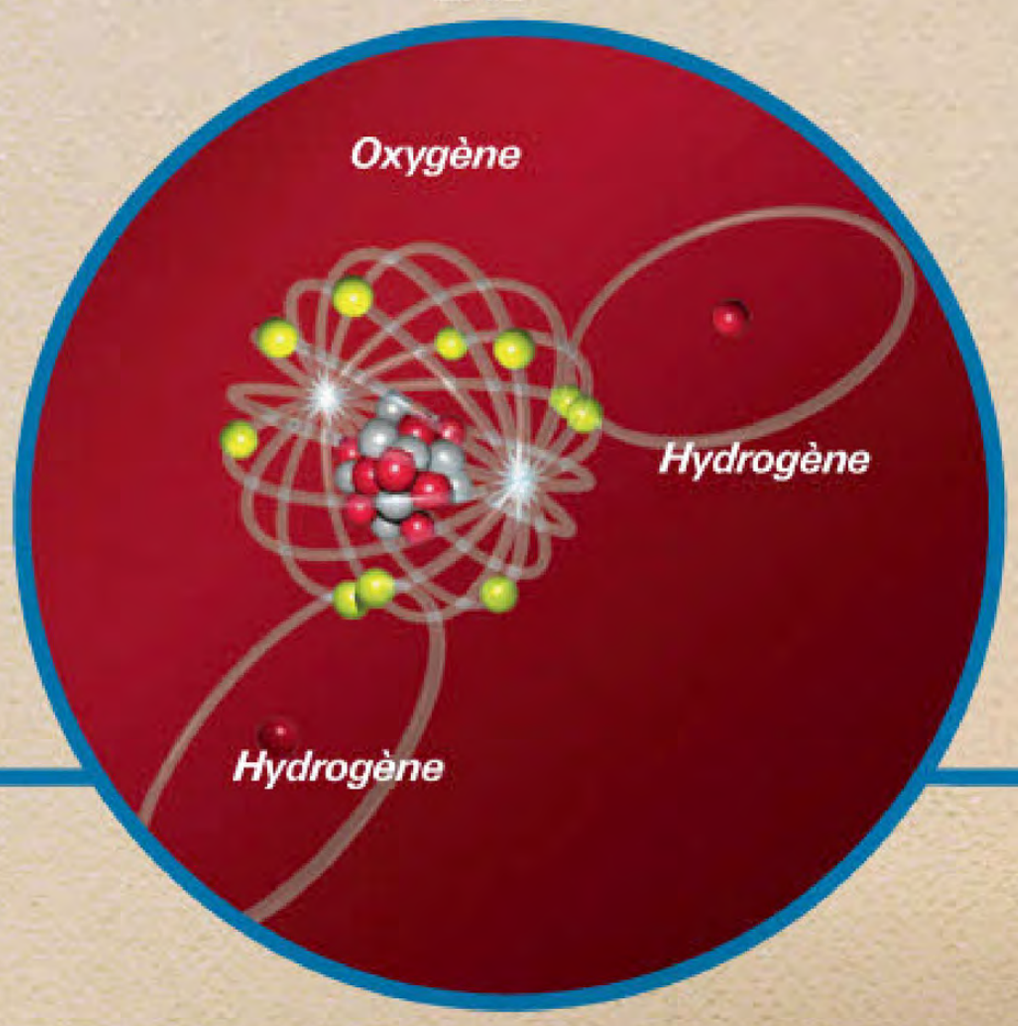
Des 4 éléments aux particules élémentaires

Molécules

Ces atomes s'associent pour former des molécules de corps simples, comme le gaz diazote qui associe deux atomes d'azote, ou composés, comme l'eau constituée d'oxygène et d'hydrogène.



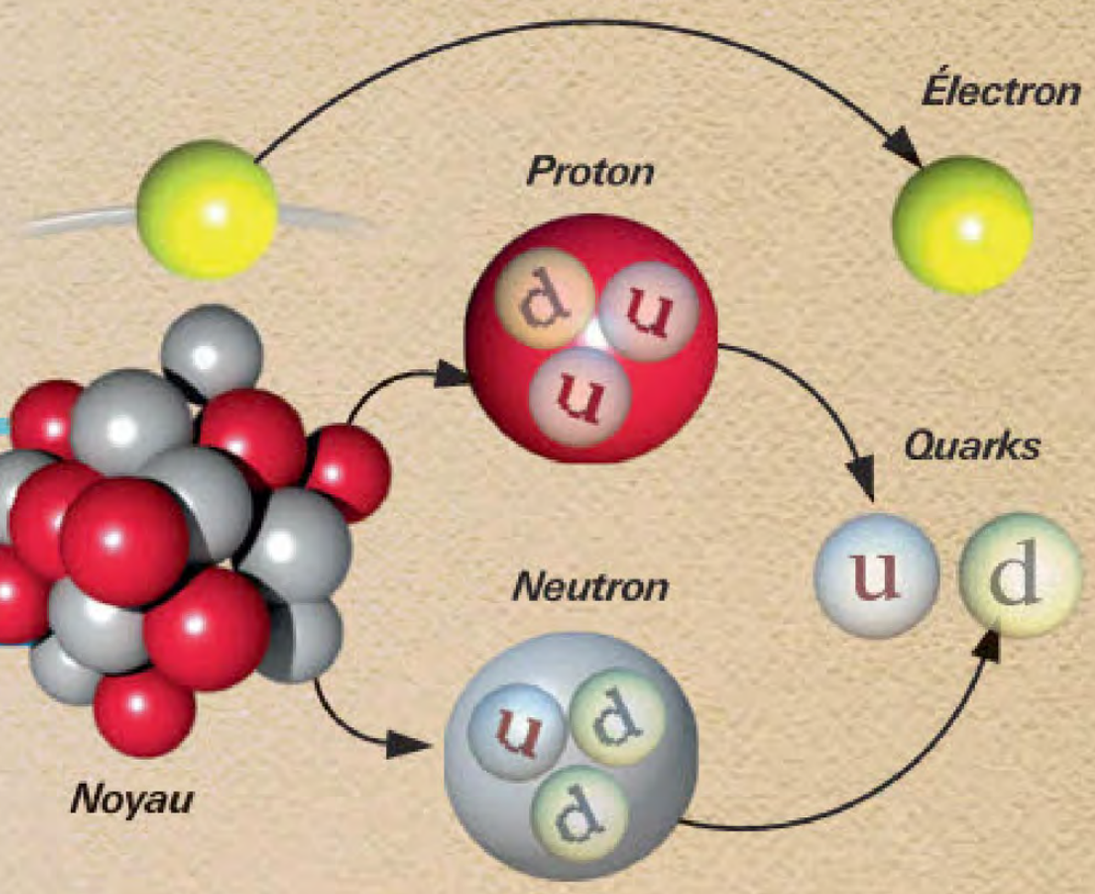
AIR



EAU

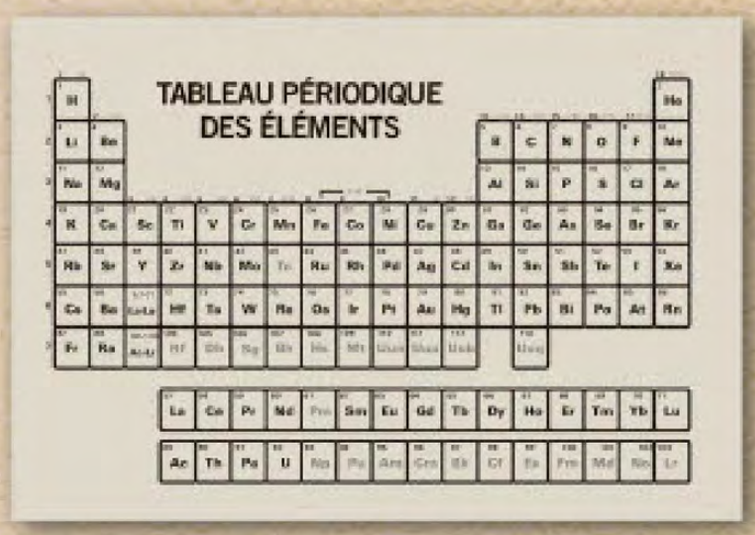
Quarks et électrons

Le noyau de ces atomes est formé de deux types de nucléons : les protons et les neutrons, qui contiennent un assemblage de quarks. Ceux-ci sont aujourd'hui considérés, au même titre que l'électron qui gravite autour du noyau, comme des particules élémentaires.



La matière, affaire classée

Le tableau périodique des éléments que l'on retrouve dans toutes les salles de chimie représente l'ensemble des éléments présents dans l'Univers. Les 92 premiers, jusqu'à l'uranium, existent à l'état naturel, les autres ayant été obtenus artificiellement en laboratoire. L'élément aristotélicien appelé « terre » est composé d'un très grand nombre d'éléments chimiques. Cependant, le sol, partie superficielle de la croûte terrestre, renferme surtout du silicium, de l'oxygène, de l'aluminium, et du magnésium. Les éléments les plus lourds comme le fer et le nickel se retrouvent préférentiellement dans le noyau. Le feu constitue un cas à part, puisqu'il s'agit d'une réaction entre un corps et l'oxygène. Une réaction d'oxydation violente.



AZAR KHALATBARI

INFOGRAPHIE : MEHDI BENYEZZAR POUR SCIENCES ET AVENIR HORS-SÉRIE

De la couronne solaire
jusqu'au cœur des flammes,
la science perce peu à peu
les secrets du feu. Capturer
la force du Soleil, recréer
son énergie au bénéfice
des hommes... le rêve
prométhéen bientôt réalisé ?

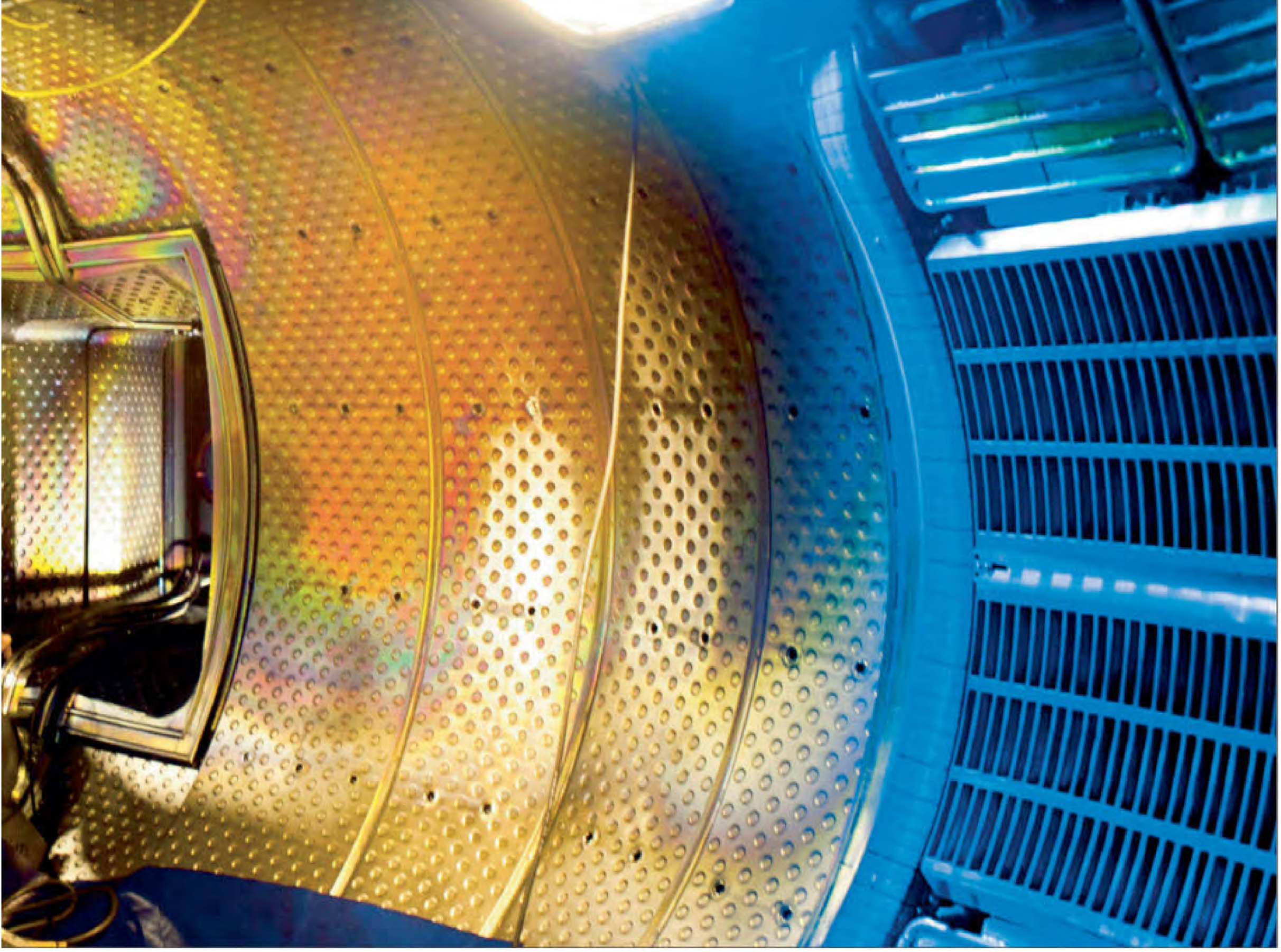
MICHAEL PLUCKERT / BIOSPHOTO / IMAGEBROKER

Sur le site du futur réacteur Iter, ingénieurs et chercheurs tentent d'apprivoiser le feu du soleil. Confrontés chaque jour à de nouveaux défis.

La fusion nucléaire : un rêve en chantier

Reportage à Cadarache CÉCILE MICHAUT
Photos VO TRUNG DUNG/LOOK AT SCIENCES POUR SCIENCES ET AVENIR

Dans ce coin de Provence situé entre Aix et Manosque, les cigales ne sont pas les seules à s'activer. Une cohorte d'ouvriers s'affairent autour d'un trou de 17 mètres de profondeur, plus grand qu'un terrain de football, et dans lequel sont plantées près de 500 colonnes de béton – des plots antisismiques. D'ici 2018 y sera construit un gigantesque « tokamak », une installation en forme de *donut* de 30 mètres de haut et 24 mètres de diamètre dans laquelle seront produites des réactions de fusion nucléaire, du même type que celles qui adviennent au sein de notre Soleil *(lire l'encadré p. 18)*. Le réacteur Iter (International Thermonuclear Experimental Reactor) en cours de construction à Cadarache (Bouches-du-Rhône) n'en est encore qu'aux fondations, mais cela n'empêche pas les physiciens de travailler d'arrache-pied pour concevoir le montage des différents composants, améliorer les matériaux (qui seront soumis à rude épreuve), prévoir les robots de



surveillance et de maintenance, ou encore simuler le comportement du plasma où s'opèrent les réactions de fusion nucléaire. Ce plasma – un ensemble de gaz ionisés dans lequel électrons et noyaux ne sont plus liés – est instable. Sa température peut chuter brutalement lorsqu'il éjecte des bouffées d'énergie, projections qui pourraient endommager la machine. Le maîtriser est un enjeu crucial.

La résistance des matériaux du réacteur d'Iter sera cruciale pour son avenir. Ici, tests dans le tokamak Tore Supra.

Dix glaçons par seconde

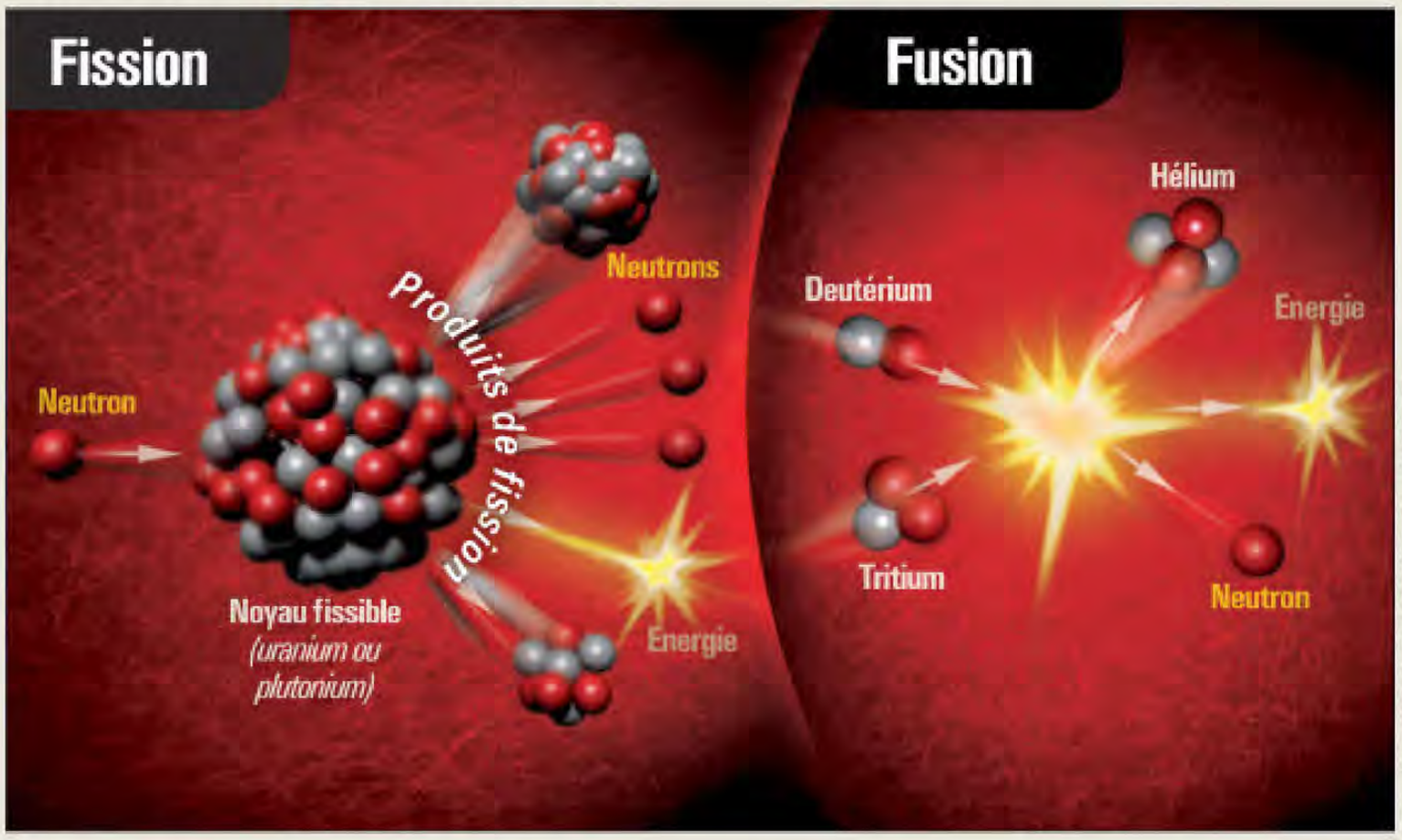
C'est dans le petit frère d'Iter – petit, mais plus ancien, puisqu'il a été mis en service en 1988 –, situé lui aussi à Cadarache, que sont menées la plupart des expériences. Avec ses tuyaux jaunes et ses cubes rouges sortant d'un corps qui mesure l'équivalent de trois étages, Tore Supra ne paie pas de mine, mais il est déjà parvenu à entretenir l'état de plasma pendant six minutes. Un record. Aujourd'hui, on y teste de nouveaux modes de chauffage afin de prolonger cette stabilité le plus longtemps possible. *« Nous envoyons notamment des ondes à haute fréquence – 3,7 gigahertz – qui apportent de l'énergie aux électrons à chaque tour de piste dans le tokamak »*, indique Alain Bécoulet, chef de l'Institut de recherche sur la fusion magnétique, sorte de « bras armé » de la recherche française sur Iter. Une cinquantaine d'instruments de mesure permettent d'analyser le plasma créé et le résultat des actions effectuées pour qu'il dure le plus longtemps possible.

Tore Supra permet également d'améliorer le mode d'injection du deutérium et du tritium, les deux éléments qui fusionneront dans Iter. *« La méthode que nous employons aujourd'hui est loin d'être optimale, car les atomes envoyés dans le plasma sous forme de gaz ont naturellement tendance à rester en périphérie, où la fusion est moins efficace*, indique Alain Bécoulet. *Nous envisageons un nouveau mode d'injection du deutérium, sous forme solide. Les glaçons de deutérium à 9 kelvins (-264 °C) pénètrent plus loin, et atteignent plus facilement le centre du plasma. Nous avons donc fabriqué un injecteur capable chaque seconde de propulser 10 glaçons à la vitesse de 300 mètres par seconde. »*

En passant dans le hall du bâtiment principal de l'Institut de recherche sur la fusion magnétique (IRFM), Alain Bécoulet désigne un fragment du divertor de Tore Supra, le « plancher » du tokamak, dont le rôle est d'extraire la chaleur du plasma. Le matériau de ce divertor doit être d'une résistance à toute épreuve : il subit des flux de chaleur atteignant 10 millions de watts par mètre carré, *« soit un quart de la puissance rayonnée par le soleil à sa surface »*, souligne le chercheur. Il est composé de cuivre dans lequel sont gravés des canaux où circule de l'eau sous pression. L'ensemble est recouvert d'un matériau à base de carbone. Celui-ci est justement capable d'évacuer une puissance de 10 mégawatts par mètre carré – record mondial… mais ne pourra être utilisé pour Iter. *« Le plasma arrache en effet des poussières de carbone et forme des hydrocarbures avec le deutérium et le tritium*, explique le chercheur. ●●●

Le site du Cea consacré à la fusion :
http://www-fusion-magnetique.cea.fr

Au cœur des réacteurs



MEHDI BENYEZZAR POUR SCIENCES ET AVENIR HORS-SÉRIE

Deux techniques permettent de fabriquer de l'énergie nucléaire. Soit on casse de gros noyaux d'atomes d'uranium ou de plutonium : c'est ce qui se passe dans nos réacteurs actuels. Soit on fusionne deux petits noyaux pour former de l'hélium – un processus à l'œuvre dans les étoiles. Depuis longtemps, l'idée de recréer la fusion nucléaire sur Terre est dans l'air. Mais la tâche se révèle malaisée : la Terre ne bénéficiant pas de l'énorme gravité qui règne au centre du Soleil, on ne peut comprimer autant les noyaux. Il faut donc les porter à 150 millions de degrés afin qu'ils vainquent la répulsion de leurs charges positives et fusionnent. Il se forme alors un état de la matière appelé plasma, très instable, qu'il faut maintenir pendant des heures… Pour cela, on confine les noyaux dans une enceinte en forme de très grosse chambre à air, le tokamak, entourée de gigantesques aimants. Contrairement au Soleil, où la fusion concerne de l'hydrogène, les tokamaks se nourrissent de deutérium et de tritium, formes d'hydrogène plus lourdes (et radioactive dans le cas du tritium), qui fusionnent plus facilement. Lors de la fusion, des neutrons de très haute énergie sont émis, dont il faut pouvoir capter l'énergie sans qu'ils endommagent la machine.

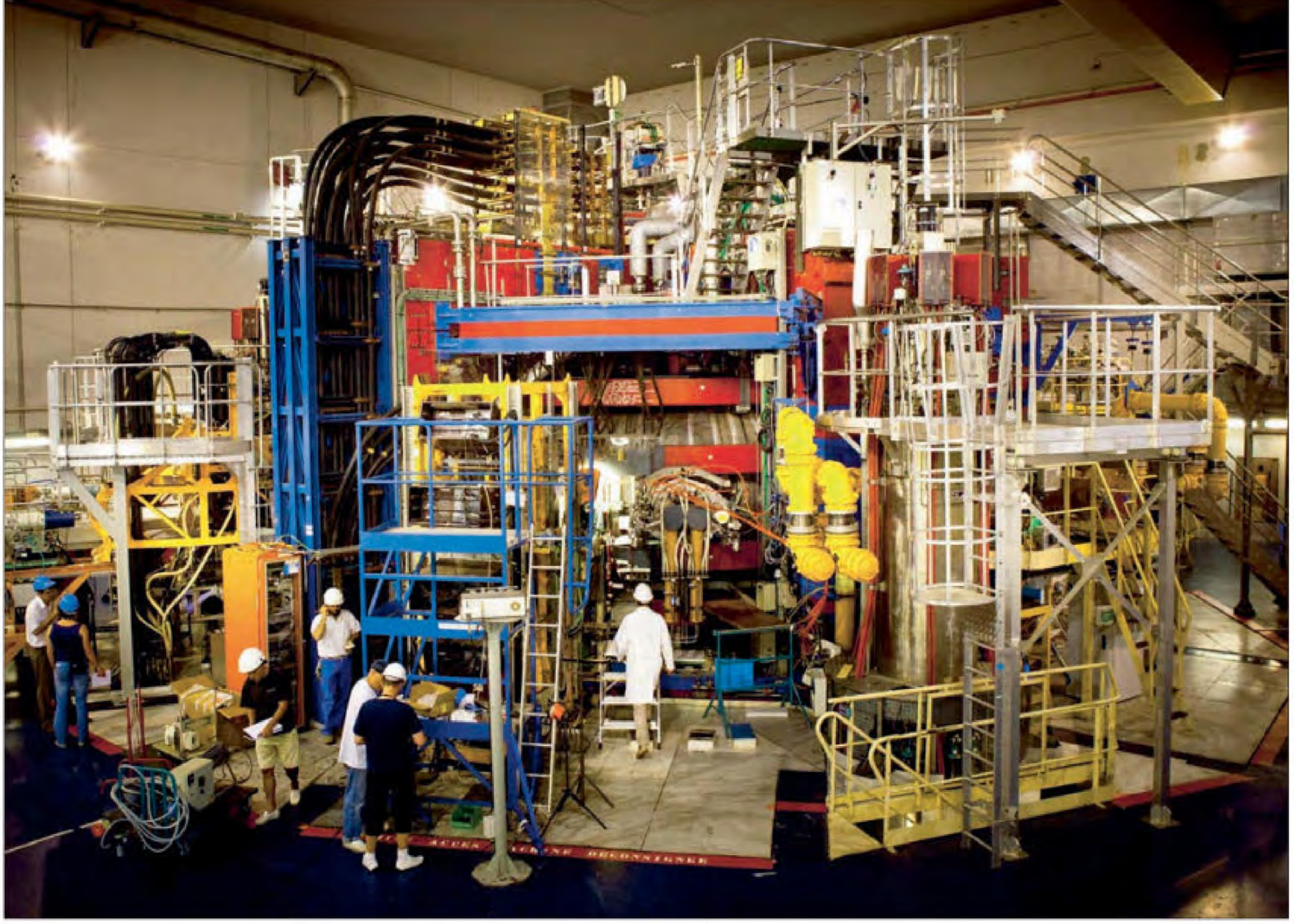
●●● *Plusieurs kilogrammes d'hydrocarbures contenant du tritium pourraient ainsi s'accumuler dans la machine.* » Cette présence de tritium radioactif serait dangereuse à l'ouverture du tokamak. De plus, la formation d'hydrocarbures peut perturber le plasma. Il est donc indispensable de mettre en œuvre un matériau encore plus résistant. C'est le tungstène qui a été choisi. Le projet West – d'une durée annoncée de sept ans – vise à tester ce nouveau divertor sur Tore Supra… à condition de trouver les financements.

Une fois Iter en service, il ne sera pas question d'y envoyer des réparateurs au moindre pépin, car « ouvrir » la machine, c'est l'arrêter pendant presque un an ! Vu le coût de fonctionnement (265 millions d'euros par an), mieux vaut prévoir des moyens d'inspection et de réparation permettant de garder le tokamak dans les conditions standard : 120 °C et un dix-milliardième de la pression atmosphérique. Vincent Bruno, chercheur au Commissariat à l'énergie atomique (CEA) à Cadarache, nous présente le robot qu'il a conçu pour intervenir dans Iter. De sa « niche » – une « enceinte de guidage » de 11 mètres de long – sort un grand serpent formé de cinq segments bourrés d'électronique et reliés par des articulations capables de tourner horizontalement à plus ou moins 90°, et verticalement à plus ou moins 45°. Ce robot de 8 mètres de long embarque une caméra panoramique capable de zoomer sur les parties à inspecter. *« Le robot doit supporter des températures de 200 °C en mode éteint, et 120 °C en fonctionnement*, indique Vincent Bruno. *Seule la caméra est refroidie. Pour le reste, nous utilisons des composants électroniques "durcis" conçus par les militaires.* » Le chercheur teste aujourd'hui de nouveaux outils de diagnostic, notamment pour localiser les fuites d'eau de refroidissement, et des méthodes de prélèvement d'échantillons.

En 3 D et en taille réelle

Encore plus étonnante est la création au sein de l'IRFM d'une salle de réalité virtuelle. Objectif : vérifier à l'avance que tout se passera bien lors de la construction et du fonctionnement d'Iter. *« Ce n'est pas au moment où l'on assemble deux composants qu'il faut s'apercevoir qu'ils sont incompatibles »*, rappelle Delphine Keller, en actionnant un « bras haptique », ou bras à retour d'effort. Ce dernier permet de simuler une résistance mécanique, par exemple lorsqu'on cogne deux objets. On peut ainsi effectuer virtuellement des opérations de montage, vérifier que l'opérateur peut accéder à la zone de travail ou que son outil est adapté. *« Cela permettra de gagner du temps lors du montage réel »*, observe la chercheuse. Dans cette salle de réalité virtuelle, le futur Iter est reproduit en taille réelle et en 3D. L'effet est saisissant. Mais si l'on prend conscience du gigantisme de la machine, cette maquette interactive permet également de repérer certaines erreurs d'aménagement : tuyaux qui se chevauchent, zones de travail trop étroites ou situées en hauteur et inaccessibles… *« Notre but est de dépister les problèmes en amont, avant que le design ne soit figé*, souligne Delphine Keller. *Nous détectons les contraintes et les intégrons dans la conception des composants.* » Bientôt, grâce à une adaptation de la Kinect (un accessoire de jeu de Microsoft permettant de contrôler les jeux vidéo sans manette), les opérateurs pourront se déplacer virtuellement dans Iter. Leurs mains bénéficieront d'un système de simulation très précis, afin de vérifier en détail les opérations de montage.

Si tout se passe comme prévu, la construction du réacteur devrait s'achever en 2018 et les premiers plasmas se former en 2019. Les chercheurs vérifieront le fonctionnement de la machine en testant



la durée et la puissance des plasmas, sans élément radioactif dans un premier temps. Le tritium sera introduit vers 2026, et les scientifiques espèrent alors atteindre le graal : produire dix fois plus de puissance que ce qu'ils injectent, soit 500 mégawatts pour 50 mégawatts consommés, pendant au moins… 400 secondes. « *Dans une deuxième phase, nous essaierons d'obtenir un facteur d'amplification de seulement 5, mais sur une durée plus longue : une heure* », espère Alain Bécoulet.

C'est dans les tuyaux de Tore Supra que sont réalisées toutes les expériences qui préparent l'exploitation d'Iter.

En première ligne face au plasma

Mais même en cas de réussite, le succès de la fusion n'est pas garanti : encore faut-il qu'elle soit rentable commercialement, ce qui dépend notamment de la vitesse d'usure des composants. S'il faut changer tous les six mois le matériau situé « en première ligne » face au plasma, il y a peu de chances que la fusion soit industrialisable. Quant aux matériaux de structure, moins sollicités, ils doivent tenir pendant toute la durée de vie du réacteur. Or, ils reçoivent des neutrons qui « bousculent » leurs atomes et créent des bulles d'hélium gazeux qui les endommagent. Actuellement, le métal choisi, « l'eurofer », ne pourrait résister que pendant le tiers de la vie du réacteur. Il faut donc l'améliorer. De la capacité des chercheurs à résoudre cette question du matériau de structure dépendra l'avenir de la fusion.

Si Iter finissait par faire ses preuves, un réacteur prototype, Demo, serait construit vers 2040, dans le but d'évaluer la faisabilité industrielle de la fusion. Il comprendrait une centrale de génération de vapeur et serait capable de produire de l'électricité grâce à la chaleur récupérée du plasma (ce qui n'est pas le cas d'Iter). Le dernier défi à relever par Demo sera probablement le plus ardu : vérifier que la fusion est rentable par rapport aux autres énergies, qui auront d'ici là fortement progressé… ■

Une cible chauffée à 200 millions de degrés !

Confiner les atomes à l'aide d'un champ magnétique n'est pas le seul moyen de les faire fusionner. Les lasers peuvent jouer le même rôle. Le National Ignition Facility (Nif) en Californie a été construit notamment dans ce but. Ses 192 puissants lasers ultraviolets concentrent leur énergie sur une minuscule cible de deutérium et de tritium, dans le but de la chauffer à plus de 200 millions de degrés. Le 5 juillet dernier, ces lasers ont atteint 1,85 million de joules pendant quelques milliardièmes de seconde, délivrant une puissance de 500 terawatts (500 milliards de kilowatts, mille fois plus que la puissance utilisée par tous les Etats-Unis pendant ce court laps de temps) sur une cible de 2 millimètres de diamètre. Mais il reste de nombreux défis à relever. Tout d'abord, il faudra construire les cibles pour un coût très faible, et les placer dans une chambre de réaction toutes les 20 millisecondes. Une chambre qui devra être capable de recueillir l'énergie de la fusion, mais aussi ses déchets. D'autre part, il faudra répéter les tirs de laser plusieurs fois par seconde, alors qu'en mars dernier, il fallait attendre… 36 heures après le record pour que les lasers soient de nouveau utilisables. Enfin, le Nif, tout comme son homologue français le Laser mégajoule (LMJ) à Bordeaux, sont des équipements destinés avant tout à tester les armes nucléaires, et ne peuvent qu'apporter une preuve de principe de la faisabilité de la fusion. Pour aller plus loin, il faudrait créer un nouvel équipement spécifique. Aucun pays ne souhaite aujourd'hui s'y lancer.

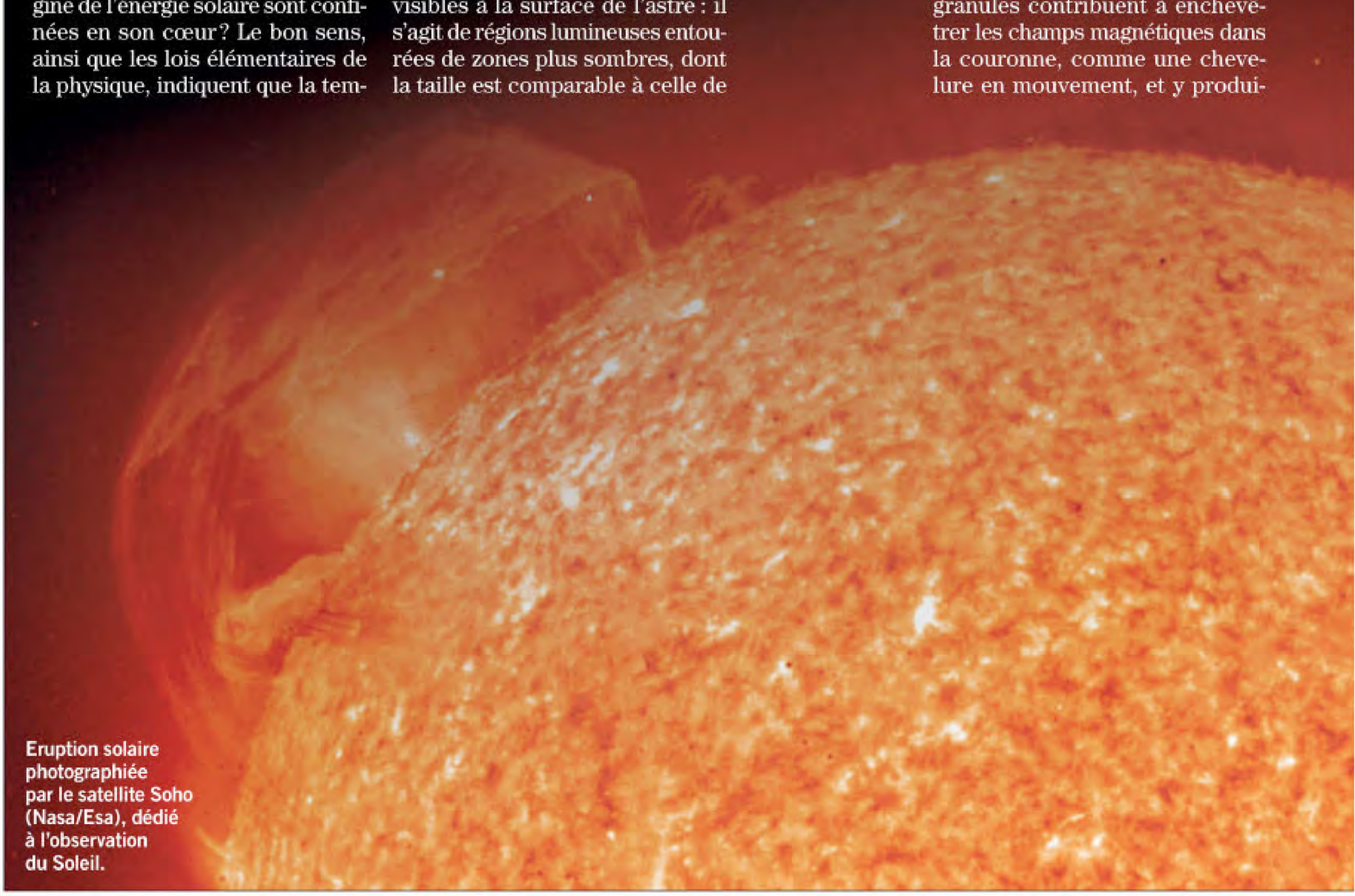
Vagues de chaleur autour du Soleil

Paradoxe : l'atmosphère de notre étoile est plusieurs milliers de fois plus chaude que sa surface. Les gigantesques tornades qui tourmentent le champ magnétique solaire n'y seraient pas pour rien...

C'est l'étoile des Terriens, et pourtant… Le Soleil, à qui l'on doit les conditions favorables à l'apparition de la vie, l'existence de l'eau à l'état liquide ou encore la formation de l'atmosphère, est loin d'avoir révélé tous ses mystères. Parmi eux, la température de sa couronne, cette région très ténue de l'atmosphère solaire qui s'étend sur plusieurs millions de kilomètres. Pourquoi affiche-t-elle plusieurs millions de degrés, alors que la température de la photosphère – la surface de l'étoile – n'est que de 5700° C ? Comment expliquer cette énorme différence si les réactions nucléaires à l'origine de l'énergie solaire sont confinées en son cœur ? Le bon sens, ainsi que les lois élémentaires de la physique, indiquent que la température devrait au contraire diminuer au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'astre… « *En réalité, même à proximité de la Terre, là où commence le champ magnétique terrestre, la température est encore de 100 000 degrés, soit près de vingt fois plus que la température de surface du Soleil*, explique Guillaume Aulanier, de l'Observatoire de Paris. *Les astrophysiciens ont donc compris qu'un autre mécanisme devait entrer en jeu pour chauffer la couronne.* »

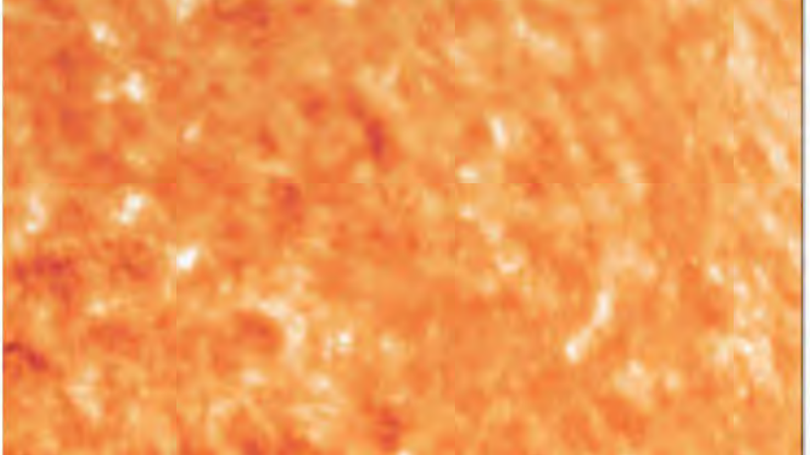
Des théories ont ainsi été élaborées, attribuant le premier rôle au magnétisme solaire. A l'origine du processus, les granulations visibles à la surface de l'astre : il s'agit de régions lumineuses entourées de zones plus sombres, dont la taille est comparable à celle de la France. Chacune d'entre elles dénote une cellule de convection : la matière y est en mouvement, à l'image des bouillonnements qui apparaissent dans une casserole d'eau sur le feu. La température des régions claires, qui correspondent à une remontée de matière, est un peu plus élevée que celle des zones sombres, où la matière s'enfonce. Ces granules changent de forme toutes les 10 à 15 minutes, ce qui traduit un mouvement de matière d'une vitesse de quelques centaines de mètres par seconde.

Or, la matière solaire étant un plasma – un gaz électriquement chargé –, les déplacements des granules contribuent à enchevêtrer les champs magnétiques dans la couronne, comme une chevelure en mouvement, et y produi-

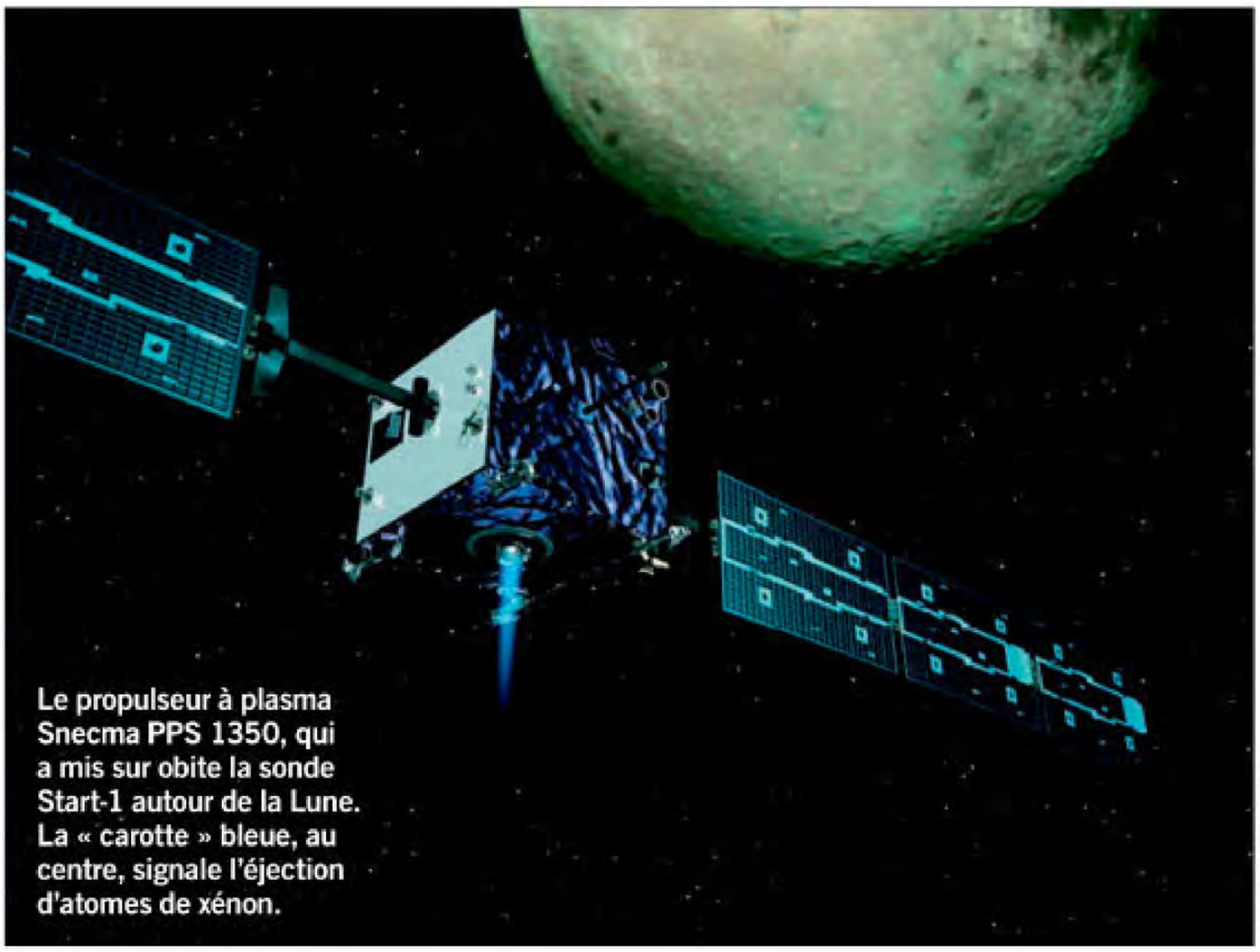


Eruption solaire photographiée par le satellite Soho (Nasa/Esa), dédié à l'observation du Soleil.

sent des courants électriques très localisés – à l'inverse d'un électro-aimant, où le courant local produit le champ magnétique global. Des courants qui, finalement, chauffent la matière de la couronne.
A défaut de confirmation définitive, cette belle théorie vient de recevoir un solide appui. En juin 2012, la revue *Nature* rapportait en effet des observations en ce sens. Des chercheurs de l'Université britannique de Sheffield ont reconstitué l'image de tornades – des mouvements emportant les lignes du champ magnétique – de plusieurs milliers de kilomètres juste au-dessus de granules… Des tourbillons qui expliqueraient la température exceptionnelle de la couronne. *« Il faut compléter les observations pour comprendre quelle est la nature des forçages de surface qui conduisent le chauffage coronal*, explique Guillaume Aulanier, *car même si la découverte de ces vortex est importante, ils ne semblent pas être omniprésents, alors que la température de la couronne, elle, ne paraît pas montrer de gros contrastes. »*
AZAR KHALATBARI



SOHO/EIT



Le propulseur à plasma Snecma PPS 1350, qui a mis sur obite la sonde Start-1 autour de la Lune. La « carotte » bleue, au centre, signale l'éjection d'atomes de xénon.

AOES MEDIALAB, ESA 2002

La propulsion ionique décolle enfin

CARBURANT SPATIAL. Quel est le moyen le plus économique de transférer une sonde qui tourne autour de la Terre vers une planète? Le moteur ionique. Si cette merveille technologique, née dans les années 1960, est longtemps restée dans l'ombre de la propulsion chimique, elle prend aujourd'hui sa revanche, du moins pour les missions d'exploration spatiale. Pourquoi? Parce que ce moteur est beaucoup moins gourmand en carburant – en général du xénon, du césium ou de l'indium – que ses concurrents chimiques nourris à l'hydrazine. Ainsi la sonde européenne Smart-1 s'est-elle mise en orbite autour de la Lune en 2004 en ne consommant que… 80 kilogrammes de xénon. Car le moteur ionique n'est pas fondé sur la combustion. Il fonctionne comme un accélérateur de particules : les ions d'un plasma – gaz chaud ionisé – y sont accélérés violemment à l'aide d'un champ électrique. Résultat? Ils sont éjectés à plusieurs dizaines de kilomètres par seconde… Ce qui entraîne une force de propulsion de sens opposé. Une force tout de même incomparable à celle des propulseurs chimiques qui, pour exercer leur extraordinaire poussée, « éjectent » une énorme quantité de gaz – 13 tonnes par seconde pour le premier étage de la fusée Saturn V. Dans le même temps, le moteur ionique n'éjecte, lui, que quelques grammes de légères particules. *« Mis au point dans notre laboratoire fin 2011, le plus puissant moteur ionique d'Europe ressemble à un cylindre de 60 centimètres de diamètre. Sa poussée est de 1 newton (1), ce qui est peu quand on compare aux millions de newtons de la propulsion chimique! »*, confirme Stéphane Mazouffre, du laboratoire Icare à Orléans. Autrement dit, un moteur ionique ne pousse pas fort, mais sur une très longue durée.
Des caractéristiques qui ne rendent pas ces propulseurs idéaux seulement pour l'exploration spatiale. Car il faut prévoir, pour tous les satellites conçus aujourd'hui, leur désorbitation en fin de mission, afin de limiter la pollution spatiale. C'est pourquoi des propulseurs ioniques seront intégrés aux satellites à venir. Et pour les anciens modèles? On imagine déjà des plateformes à propulseur ionique qui viendraient s'y amarrer pour les désorbiter. *« Il est tout à fait possible,* reprend Stéphane Mazouffre, *que d'ici quelques années, la plupart des satellites et des sondes soient entièrement électriques – toutes leurs manœuvres en vol (contrôle d'orbite et d'attitude, transfert d'orbite, désorbitation, etc.) étant assurées par des propulseurs ioniques. »* Peut-être suffira-t-il alors d'un plein de gaz pour aller explorer Mars ou des planètes encore plus éloignées? **PHILIPPE PAJOT**

1. Force qui, appliquée à une masse d'un kilogramme, augmente sa vitesse, en une seconde, d'un mètre par seconde.

L'énergie de mille soleils sur une microcellule

De nouvelles techniques parviennent à mieux concentrer les rayons du Soleil. Du coup, les rendements énergétiques de la filière s'envolent... et les industriels s'en mêlent.

Mettre le soleil en bouteille! Ce rêve est en train de devenir réalité. Comme aime à le rappeler le prix Nobel de physique italien Carlo Rubbia, sur chaque mètre carré de Sahara, il tombe chaque année l'équivalent de deux barils de pétrole en rayonnement solaire. Voilà pourquoi de nombreux industriels – dont les Français Areva, Alstom, Solar Euromed et Schneider, regroupés sous le label France Solar Industry – ont décidé de concentrer ce rayonnement et de le transformer en électricité. Plusieurs réalisations ont déjà montré le chemin, à commencer par le four d'Odeillo (Pyrénées-Orientales). Installation pionnière à l'échelle mondiale dans les années 1970, elle a repris récemment du service avec les recherches sur l'augmentation des températures menées par le laboratoire CNRS de Perpignan Promes. Aux Etats-Unis, la centrale de Kramer Junction fonctionne depuis 1980 sur le principe de concentrateurs-réflecteurs chauffant un fluide caloporteur circulant dans des tubes. En Espagne, deux centrales à tour ont été mises en service ces dernières années. Dans chacune d'elles, les rayons du soleil sont réfléchis, via 624 miroirs mobiles de 120 mètres carrés, sur le sommet d'une tour de 125 mètres de hauteur abritant une chaudière. La température peut ainsi atteindre les 1 000° C, record mondial. Au Maroc, en Algérie, en Egypte, ces centrales thermodynamiques dites à concentration commencent également à sortir de terre.

Les avantages de la concentration du flux solaire ont été perçus par la filière photovoltaïque qui cherche, elle aussi, à augmenter ses rendements en réduisant notamment les surfaces de conversion. La concentration autorise, entre autres, l'utilisation de cellules très performantes, mais très onéreuses, donc à priori impossibles à mettre en œuvre sur de grandes surfaces. Mais les combiner avec des miroirs permet d'envisager une forte diminution des coûts. Développées en laboratoire, ces cellules « multijonctions » sont un empilement de très fines couches, réalisées chacune dans un matériau spécialisé dans la conversion d'une partie du spectre solaire. Avec un rendement record : 43,5 % aux Etats-Unis!

Une autre approche explorée par quelques laboratoires, y compris français, cherche à miniaturiser les cellules photovoltaïques afin d'augmenter la concentration optique et de réduire le coût des matériaux actifs. Toujours dans la même perspective, une nouvelle voie a été récemment ouverte en France, basée sur l'utilisation de microcellules en couches minces de quelques dizaines de micromètres de diamètre, sur lesquelles est focalisée la lumière collectée. *« En utilisant le CIGS, un matériau semi-conducteur fait d'un alliage de cuivre, d'indium, de gallium et de sélénium, il est possible d'atteindre avec ces microcellules une concentration de 1 000 soleils – mille fois mille watts par mètre carré! –, donnant un rendement théorique de 26 %*, précise Daniel Lincot, directeur de l'Institut de recherche et développement sur l'énergie photovoltaïque (CNRS/EDF/Chimie Paristech). *Les résultats en laboratoire dépassent déjà la barre des 20 %, avec des cellules très simples déposées sur verre. »*

La plus grande centrale thermique solaire du monde, à Kramer Junction (Californie), bénéficie de 340 jours de soleil par an.

Chercheurs et industriels s'attachent à produire de l'énergie en utilisant le moins de matière possible, surtout lorsqu'elle est rare. Aussi, la concentration s'imagine désormais à l'échelle nanométrique. En confinant la lumière à l'interface entre un métal et de l'air ou un semi-conducteur à la longueur d'onde de la lumière, soit autour de 500 nanomètres, on crée des nanorésonateurs qui absorbent la quasi-totalité de la lumière incidente sur une épaisseur de quelques dizaines de nanomètres. *« Nous avons montré qu'il était possible de combiner plusieurs de ces nanorésonateurs pour couvrir une large partie du spectre solaire et atteindre un rendement théorique de 17 % »*, explique Jean-Luc Pelouard, du laboratoire de Photonique et de Nanostructures (CNRS). Dans ces échelles proches de l'infiniment petit, c'est une nouvelle physique qui est mise en œuvre. Elle devrait vite déboucher sur des applications industrielles. Pour cela, vient de voir le jour l'Institut photovoltaïque d'Ile-de-France, qui associe le CNRS, Polytechnique, EDF, Total, Air Liquide, et les industriels Riber et Horiba Jobin Yvon. Tous unis pour mettre le soleil en bouteille.

LOÏC CHAUVEAU

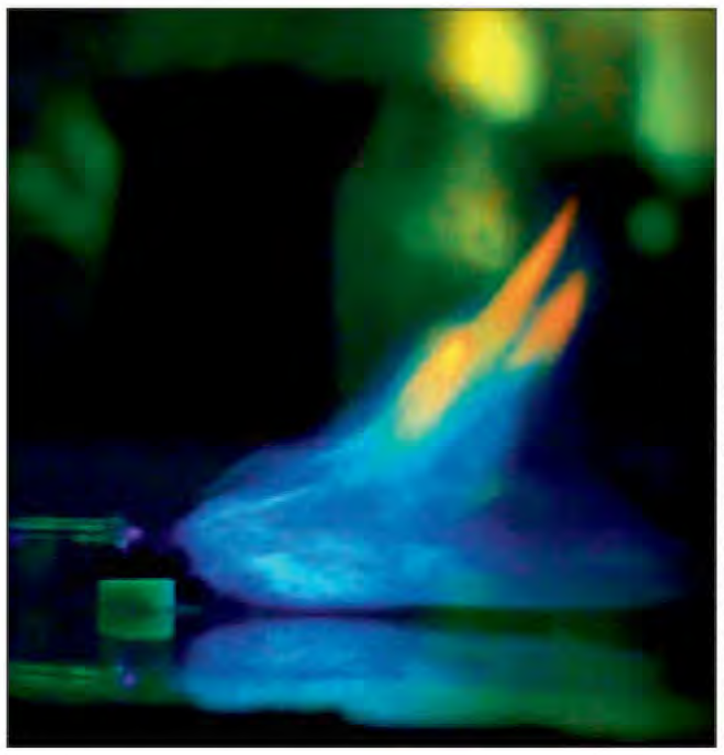
M. BONDUS/P.L

De l'électricité dans le gaz

A Harvard, des scientifiques ont réussi, grâce à un courant alternatif de 600 watts, à arracher des flammes au combustible qui les alimentait. Mais de là à constituer un corps de pompiers électriques...

Un coup de baguette magique ! Au printemps 2011, l'équipe du professeur George Whitesides, de l'université de Harvard, est parvenue à éteindre une flamme de 48 centimètres de haut avec de l'électricité. Le résultat a fait sensation à la Société américaine de chimie. *« Une flamme est une réaction chimique dans laquelle une partie du combustible est ionisée, c'est-à-dire séparée en particules chargées positivement et négativement*, a expliqué simplement Ludovico Cademartiri, le post-doctorant de l'équipe, qui a réalisé les essais. *Le nuage de gaz ainsi formé est une sorte de plasma, sensible à l'électricité. Ce phénomène est connu depuis au moins deux cents ans – des expériences ont déjà montré qu'il était possible, avec des champs électrostatiques, de "courber" des flammes. »* A Harvard, l'expérience a consisté à diriger vers le foyer une sorte de baguette traversée par un fil électrique dispensant un courant alternatif de 600 watts : la flamme de méthane a été « sapée », littéralement arrachée de son support.

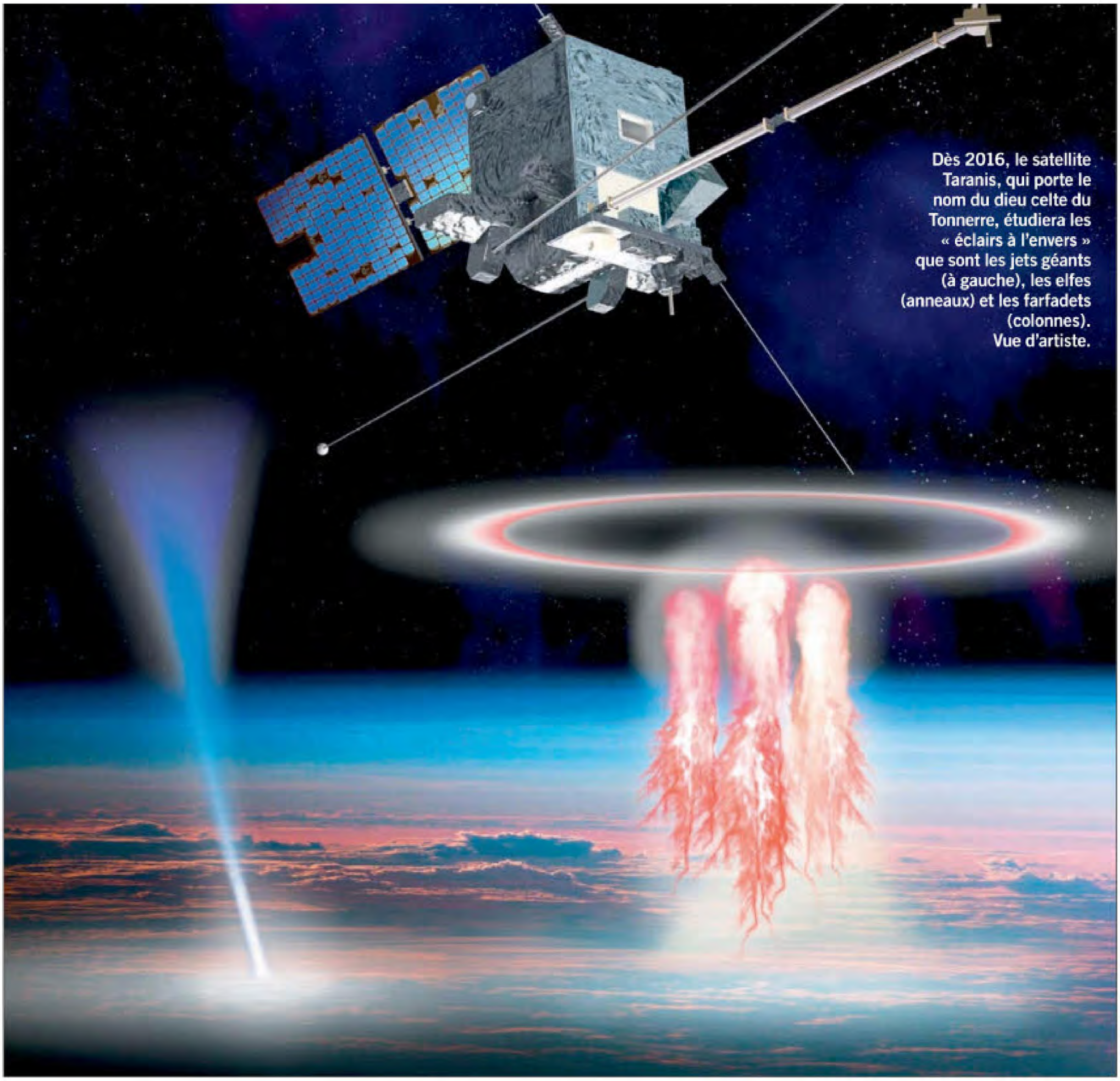
Décoller les flammes à l'électricité : une avancée présentée en juin dernier par le *New York Times* comme ouvrant de nouveaux horizons en matière de lutte contre les incendies. Extrapolation loufoque ou promesse de progrès spectaculaires ? A première vue, il semble effectivement plausible d'envisager d'éteindre un feu en l'arrachant à son combustible. Mais pour Pascal André, professeur de physique des plasmas à l'université de Clermont-Ferrand, l'affaire ne devrait pas connaître d'applications pratiques majeures : *« Les flammes, certes, sont pleines d'ions positifs et d'électrons. Pour peu qu'on leur applique une sorte de choc électrique, on peut les déstabiliser au point qu'elles se décrochent de leur support. Cependant, si l'expérience de Harvard marche, c'est parce que la flamme a pu être "soufflée"… dans un environnement froid. »* Or, dans un incendie, tout est généralement chaud ! Le physicien français estime que la seule application envisageable d'un tel dispositif reste la lutte contre les incendies dans des milieux confinés très spécifiques comme les oléoducs. C'est d'ailleurs déjà à la dynamite que l'on éteint les puits de pétrole en feu : la déflagration, par l'onde de choc qu'elle génère, souffle les flammes comme des bougies d'anniversaire. Ce cas bien particulier mis à part, il semble singulièrement contre-indiqué d'utiliser de l'électricité pour éteindre un feu, les deux ne faisant pas vraiment bon ménage, comme le précise Pascal André : *« Pour éteindre un feu, il faut dissiper l'énergie qui s'y trouve. Or, le courant électrique ne fait qu'en rajouter ! »* Une évidence qui finit de rendre totalement incongrue la mise au point d'un dispositif utilisable par les sapeurs-pompiers !



JABULANI BARBER ET LUDOVICO CADEMARTIRI/HARVARD

Une flamme de méthane peut être décollée de son support par une baguette électrifiée.

CLARA DELPAS



Dès 2016, le satellite Taranis, qui porte le nom du dieu celte du Tonnerre, étudiera les « éclairs à l'envers » que sont les jets géants (à gauche), les elfes (anneaux) et les farfadets (colonnes). Vue d'artiste.

CNES/DLCROS

Dans le ciel, d'étranges lueurs...

Les nuages d'orage envoient parfois de spectaculaires décharges électriques vers la haute atmosphère, jusqu'à 90 kilomètres d'altitude. Des phénomènes lumineux que l'on commence tout juste à décrypter.

La Réunion, 7 mars 2010. Un orage se prépare. Passionné d'astronomie, Patrice Huet, de la Maison du Volcan, a installé à 1 600 mètres d'altitude ses appareils de prise de vue afin de capturer les éclairs. Mais ce qu'il va immortaliser ce soir-là est bien plus inhabituel. En une heure à peine, cinq « jets géants » vont jaillir d'un cumulonimbus pour s'élever à près de 90 kilomètres d'altitude. *« Ce sont des éclairs à l'envers*, explique Serge Soula, du Laboratoire d'aérologie de l'observatoire Midi-Pyrénées, à Toulouse. *La décharge électrique se produit dans une atmosphère où l'air est raréfié, ce qui explique l'aspect de ces phénomènes, très différent de celui des éclairs qui se propagent vers le sol. »*

L'analyse des vidéos par Serge Soula et son équipe permet d'en savoir davantage sur le mécanisme à l'œuvre dans ce type d'« événement lumineux transitoire » (TLE). Celui-ci se déroule en deux étapes. Lors de la première, baptisée *leading jet*, la décharge électrique monte en se ramifiant. Chaque branche cherche son chemin dans les régions les plus conductrices de l'air… Puis survient la phase *trailing jet* : une seconde décharge emprunte les ramifications tracées par la première, provoquant le long des branches la formation de perles très lumineuses dont l'intensité décroît progressivement.

Les cinq jets géants ont duré de 0,3 à 0,8 seconde environ. Leur point

commun : juste avant qu'ils ne soient émis, il s'est produit à l'intérieur du nuage une série de décharges électriques et lumineuses. *« Cette observation valide le modèle proposé en 2008 par l'équipe de Paul Krehbiel, professeur de physique à l'université du Nouveau-Mexique à Socorro (Etats-Unis) »*, souligne Serge Soula. Selon cette théorie, au cœur du nuage se trouvent des couches de charges électriques portées par des particules de glace : au centre, des charges négatives en grande quantité, vers le sommet, des charges positives moins nombreuses. Cette couche positive s'épuise, neutralisée par le bombardement de décharges électriques venant de la couche négative, qui illuminent le nuage. Les charges négatives parviennent ainsi à se frayer un chemin jusqu'au sommet du nuage, et le jet géant se déclenche.

Ce mécanisme a été confirmé, pour les cinq jets de la Réunion, par des observations réalisées… à 8 000 kilomètres de là ! L'observatoire géophysique de Nagycenk, en Hongrie, a en effet enregistré les ondes électromagnétiques basse fréquence (du type des ondes radio) qu'ils ont émises dans l'atmosphère. Les données ont montré que la polarité était la même pour tous les jets : les charges montées en altitude étaient négatives.

« Les jets géants ne sont connus que depuis dix ans, reprend Serge Soula. *Il reste à déterminer leur contribution au circuit électrique global, c'est-à-dire à la circulation des charges électriques entre l'atmosphère et le sol. On peut aussi imaginer, vu l'énergie dégagée, qu'ils déclenchent la formation d'espèces chimiques dans la haute atmosphère. Mais cela reste à préciser. »* En 2016, le satellite Taranis du Cnes apportera sans doute une partie de la réponse. Il observera en permanence, afin de mieux comprendre les mécanismes complexes qui leur donnent naissance, les jets géants, mais aussi leurs cousins « elfes » – des anneaux lumineux de plusieurs centaines de kilomètres de diamètre – et autres « farfadets » – gigantesques lueurs en forme de carotte, de colonne ou de méduse dues à des éclairs de grande taille.

JEAN-FRANÇOIS HAÏT

RÉVÉLATIONS SUR LE CŒUR DES FLAMMES

COMBUSTION. Comment connaître la température d'une flamme, mais aussi la vitesse des gaz et les réactions chimiques qui se produisent en son sein ? Jusque dans les années 1980, à côté des diagnostics effectués grâce à la spectroscopie de masse ou la chromatographie en phase gazeuse, il fallait pour répondre à ces questions placer des sondes *in situ* – ce qui modifiait les conditions de l'expérience. Mais à partir des années 2000, de nouveaux procédés ont bouleversé notre connaissance des phénomènes de combustion. Parmi eux, la fluorescence induite par laser.

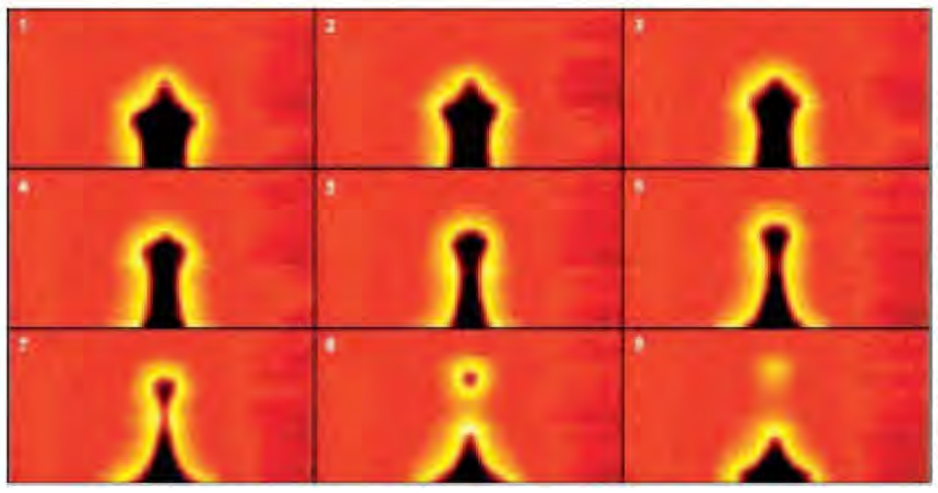
Cette technique non intrusive et très sensible permet notamment de mesurer le champ de température dans les flammes et de détecter des espèces chimiques présentes en faibles quantités, comme le radical hydroxyle (OH) ou le monoxyde d'azote (NO), qui s'oxyde en dioxyde d'azote (NO_2), un polluant notoire. Il suffit de répéter les mesures à haute fréquence pour « filmer » les réactions chimiques produites. Il est possible par exemple de suivre l'apparition et la disparition des espèces radicalaires (1), dont on ignorait tout auparavant.

Depuis quelques années, le feu des lasers scrute tout particulièrement les biocarburants, afin de diagnostiquer lequel envoie le moins d'émissions dans l'air : un enjeu environnemental de taille.

PHILIPPE PAJOT

1. Molécules possédant un ou plusieurs électrons libres. Très réactives, elles interviennent comme produit intermédiaire dans les réactions de combustion.

Le laser permet de déterminer avec précision la composition d'une flamme.



J. H. FRANCK, SANDIA NATIONAL LABORATORIES

Quand les coupeurs de feu soulagent les urgences

GUÉRISSEURS. Mme R. est commerçante, M. C. agriculteur, M. B. chirurgien. Quand les urgences des hôpitaux d'Annemasse, Annecy et Thonon font appel à eux, ils laissent leurs affaires un moment pour répondre à une demande insolite : soulager, par un procédé dont le secret leur appartient, les brûlures de patients hospitalisés. Mme R., M. C. et M. B. sont coupeurs de feu. Ces guérisseurs, dits aussi barreurs, leveurs ou passeurs de feu, recourent à différentes méthodes pour soulager la douleur et améliorer la cicatrisation : prière, formule, imposition des mains ou pure concentration. Leur don, ils l'ont reçu ou découvert par eux-mêmes et n'en attendent pas rétribution. Ils se déplacent rarement auprès du blessé, pouvant recueillir par téléphone les indications dont ils ont besoin. Pour sa thèse de doctorat, soutenue en 2009, le docteur Nicolas Perret, généraliste haut-savoyard, est allé explorer ces étonnantes pratiques des services d'urgence de son département. Sur les 134 soignants qu'il a interrogés, quatre sur cinq estiment qu'il est souhaitable, voire indispensable de recourir à un coupeur de feu pour favoriser la guérison des brûlures. Une spécialité savoyarde ?

Pas vraiment. De la Bretagne à la Lozère en passant par le Rhône, les services d'urgence et les pompiers font appel à ces guérisseurs… sans le revendiquer ni haut ni fort. Il semblerait qu'existe une sorte de coexistence pacifique autour de la considération suivante : pourquoi priver les patients – y compris les grands brûlés – d'un recours qui n'entrave pas la médecine hospitalière ? Tout de même… Qu'a donc la brûlure de particulier pour que des médecins fassent appel à des « sorciers » ? Le docteur Perret n'a pas de réponse définitive. Tout juste relie-t-il cette pratique surprenante à ce qui relève de la symbolique et de la croyance dans la relation médecin-malade. Rien de satanique dans tout cela, rien non plus qui provoque l'intervention du conseil de l'Ordre ou des autorités de tutelle des hôpitaux… Juste l'humble constat que dans l'art de soigner, bien des choses ne relèvent pas de la science exacte.

PASCALE PISANI

« Le phlogistique, du feu fixé dans la matière »

Interview. Longtemps, alchimistes et savants ont imaginé qu'une mystérieuse substance contenue dans les corps était libérée lors de la combustion. Le XIXe siècle a eu raison de cette séduisante théorie.

Dans le long cheminement qui a mené d'Aristote à la chimie d'aujourd'hui, comment a évolué le statut de l'élément feu ?
Aujourd'hui, le phénomène de combustion qui se manifeste par le feu est compris, maîtrisé et quantifié. Nous savons qu'il s'agit d'une oxydation, c'est-à-dire d'une combinaison entre l'oxygène – élément présent dans l'air et dans l'eau – et certains composés. Une oxydation rapide, contrairement à la rouille par exemple, qui se forme lentement et sans flamme sur les métaux. Dans la théorie des quatre éléments issue d'Aristote, le feu n'était pas uniquement un élément ; c'était aussi un instrument entre les mains des chimistes. Le feu permettait de distiller des substances et de produire une évaporation par chauffage pour récupérer des résidus. Il y a d'ailleurs une continuité entre cette pratique du Moyen Age et la chimie actuelle : on tente de transformer la matière en fabriquant des substances qui se substituent à celles que l'on trouve dans la nature, et donc de reproduire celle-ci. Une voie qui mène aujourd'hui aux produits de synthèse, mais qui s'apparentait alors à une volonté de s'élever au rang du Créateur. C'est pourquoi les alchimistes, parfois dénommés « philosophes par le feu », furent l'objet de persécutions... Puis, au XVIIIe siècle, les chimistes ont découvert comment transformer la matière par voie humide, et le feu a perdu son rôle d'instrument privilégié.
Quant au statut du feu en tant qu'élément, c'est une conception tenace. Alors que l'on sait aujourd'hui que la combustion est un processus d'oxydation engageant une réaction chimique, pendant longtemps, le feu fut considéré comme une substance entrant dans la composition de certains corps, et pouvant être dégagée lors de la combustion. Au XVIIIe siècle, il fut baptisé phlogistique, ou feu combiné. Ce nom, introduit par l'Allemand Georg Ernest Stahl, vient d'un mot grec qui signifie « brûlé ». La libération du phlogistique permettait de rendre compte de la vive chaleur accompagnée de lumière qui semble jaillir des corps quand on les brûle.

FRANÇOIS GLÆNET

BERNADETTE BENSAUDE-VINCENT
Professeur de philosophie à l'université Paris I, spécialiste de l'histoire des sciences. Dernier ouvrage paru : *Les Vertiges de la technoscience,* La Découverte, 2009.

Comment était construite cette théorie du phlogistique ?

C'est un cadre théorique très cohérent ! Au début du XVIIIe siècle, Stahl élabore une théorie chimique qui s'appuie sur l'expérience, rend compte d'un grand nombre de phénomènes (notamment la combustion, la calcination, l'état métallique, etc.) et permet de prédire le comportement des corps. Si le feu en tant que tel est encore considéré comme un instrument, l'élément qui lui correspond est le phlogiston. Pour Stahl, le phlogistique, c'est ce feu fixé dans la matière et qui s'en échappe lors de la combustion. Les corps en contiennent à des degrés divers ; plus ils en renferment, mieux ils brûlent. Certains sont même presque entièrement composés de phlogistique, comme le charbon pur. Et lorsqu'on isole le gaz dihydrogène, surnommé « air inflammable », dans les années 1770, on le suppose saturé de phlogiston. Ce phlogiston est présenté comme une substance ●●●

DU PERCOLATEUR A LA LANCE D'INCENDIE

C'est presque un paradoxe ! Alors que la combustion n'a quasiment plus de secrets pour les physiciens, le feu dévaste encore chaque année des milliers d'hectares de forêt. L'élément n'est donc pas totalement maîtrisé… Depuis une dizaine d'années, cependant, les scientifiques se servent pour expliquer sa propagation d'un modèle mathématique élaboré par le Britannique John Hammersley à la fin des années 1950 : la percolation, qui rend compte aussi de l'écoulement des fluides à travers un tas de sable, de la diffusion d'une rumeur dans une foule… ou encore de l'écoulement de l'eau dans un percolateur. Car la progression de l'eau dans le café moulu n'est pas continue, mais dépend d'un « seuil », lié bien sûr à la densité des particules de café. Lorsqu'on tasse la poudre, ce seuil se décale, et l'eau met davantage de temps avant de ressortir « caféinée ». Dans le cas d'une forêt, le seuil est lié à l'emplacement des arbres dans l'espace. S'ils sont peu nombreux, la valeur critique n'est pas atteinte et l'incendie ne progresse pas. Au-delà, la propagation est inévitable. La théorie de la percolation détermine ainsi l'évolution du front de feu : un arbre intact à l'instant t prend feu à l'instant $t + 1$ si deux au moins de ses voisins immédiats brûlent. Puis, lorsque la proportion d'arbres en feu excède un nouveau seuil, toute la forêt s'embrase instantanément. Le phénomène est appelé changement de phase, à l'image du gel qui se forme brusquement lorsque l'eau atteint une valeur critique. Ainsi la théorie d'Hammersley permet-elle de prévoir le comportement d'une parcelle face aux flammes et d'aider les pompiers à déterminer leur stratégie pour lutter contre l'incendie.

Le spectacle du feu jaillissant de la Terre ne pouvait que faire croire aux hommes qu'il en était l'un des constituants primordiaux. Illustration anonyme, années 1980.

DE AGOSTINI/LEEMAGE - THE GRANGER COLLECTION / RUE DES ARCHIVES

●●● impondérable, le corps brûlé ou calciné étant considéré comme déphlogistiqué. En toute logique, il devrait alors être plus léger qu'avant. Cela fonctionne en effet avec certains éléments comme le charbon, puisqu'après combustion il en reste peu de chose.

Cette théorie du phlogistique a-t-elle été rapidement réfutée ?

Elle se heurtait à une énigme : pourquoi le poids de certains métaux augmente-t-il quand on les calcine ? Ce problème a constitué un des grands défis pour les chimistes de l'époque. Parmi eux, Louis Bernard Guyton de Morveau (1737-1816) jouissait d'une grande aura. Il était en effet à l'origine d'une nomenclature particulièrement adaptée à la chimie. Ardent défenseur de Stahl à cette époque (par la suite, il se ralliera au camp opposé), Guyton de Morveau explique cette augmentation de poids en supposant que le phlogistique est plus léger que l'air. De ce fait, sa présence dans une substance la fait paraître plus légère, son absence plus lourde. D'autres chimistes supposent que le phlogistique obéirait à une pesanteur différente de celle qui agit sur la matière… Les corps s'attirent tous selon la loi de l'attraction de Newton, sauf le phlogiston, qui agit comme force répulsive.

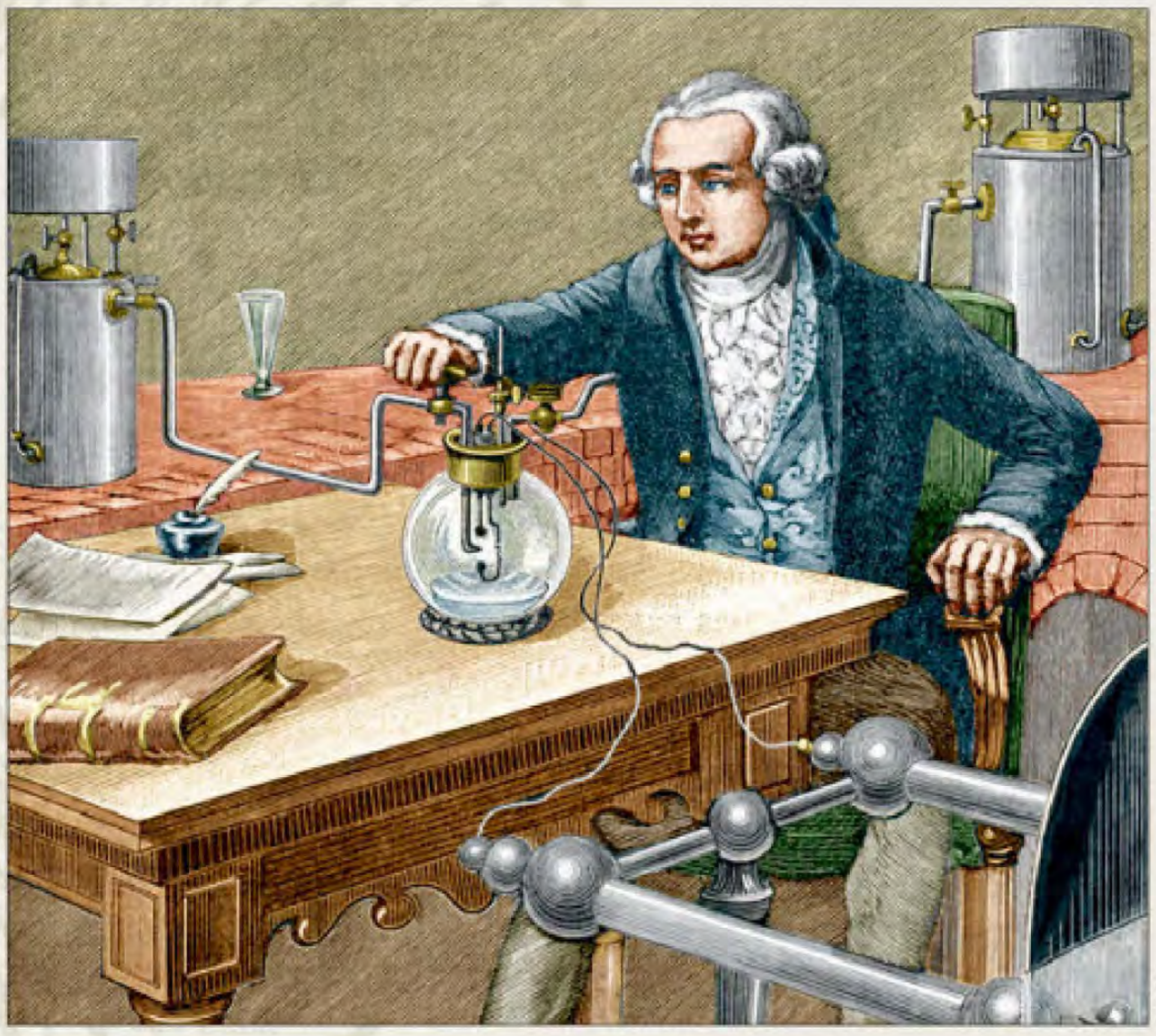
> « Les corps s'attirent tous selon les lois de Newton… sauf le phlogiston, qui agit comme force répulsive

Pouvait-on tester ces hypothèses ?

Les balances existaient déjà dans les laboratoires de chimie, parmi les fourneaux, vessies, cornues, alambics… Mais les expériences sur les gaz – il faut les recueillir et mesurer leur volume – exigeront de les perfectionner. Les chimistes européens mobilisent le savoir-faire des artisans de leur pays. Grâce à Lavoisier, les fabricants parisiens Mégnié et Fortin se taillent une renommée qui dépasse les frontières. Avec ses balances, Lavoisier transforme la chimie. A chaque expérience, il fait le bilan de masse de la réaction. C'est ainsi qu'en 1772, alors qu'il travaille sur la calcination, il commence à s'interroger sur le phlogistique. Il fait brûler du soufre, puis du phosphore dans des récipients fermés. Il procède à des pesées minutieuses avant et après la réaction – du tout et de chaque partie séparément. Il vérifie que le poids du récipient est inchangé. Mais constate que celui du soufre et du phosphore a augmenté au cours de la réaction. Sa conclusion est claire : « *Cette augmentation de poids vient d'une quantité prodigieuse d'air qui se fixe pendant la combustion et qui se combine avec les vapeurs.* » Il est convaincu qu'il tient là un résultat de première importance. Il remet alors un pli cacheté à l'Académie des sciences pour s'assurer la primauté de cette découverte.

Diriez-vous que ce résultat a été un tournant dans l'histoire de la chimie ?

Cette expérience a souvent été présentée comme l'acte fondateur de la chimie moderne, qui a définitivement écarté – par le feu – la théorie des quatre éléments d'Aristote. Cependant, dans le contexte global de l'époque, sa portée est à nuancer. D'abord, l'augmentation de poids des métaux calcinés n'a pas été découverte par Lavoisier. Le problème avait été déjà identifié par de nombreux chimistes quelques décennies auparavant et avait alimenté de nombreux débats. Beaucoup avaient critiqué le phlogistique. Ensuite, si Lavoisier a mis en évidence un phénomène nouveau, il n'a pas apporté la preuve de l'inexistence du phlogistique. En 1777, il présente à l'Académie des sciences, en séance publique, un mémoire intitulé *Sur la combustion en général.* Les documents de l'époque montrent que cette séance était attendue comme un grand événement au cours duquel Lavoisier allait renverser la doctrine de Stahl. La lecture des écrits de Guyton de Morveau, qui suit le débat avec beaucoup d'attention, indique que Lavoisier n'a pas définitivement détrôné le phlogistique au cours de cette séance, mais a simplement réussi à déplacer le problème… Il écrit : « *[…] Suivant monsieur Lavoisier il n'y a point de matière du feu dans les corps combustibles ; elle n'est qu'une des parties constituantes de l'air. C'est l'air et non ce que nous regardions comme corps combustible qui se décompose dans toute combustion […].* » Ainsi, la combustion et la calcination sont pour Lavoisier une combinaison avec une partie



AKG/SPL

Grâce à sa magistrale expérience de la décomposition de l'eau, Lavoisier assoit sa réputation de chimiste et fait accepter ses positions contre le phlogistique. Illustration de la *Physique populaire*, 1891.

AGENCE MARTIENNE

de l'air qui libère la matière du feu (nommée calorique) composant tous les gaz. Exit le phlogistique, bienvenue au calorique.

Mais, de fait, en avait-on fini avec la doctrine d'Aristote?

Pas vraiment, car de nombreux chimistes tentaient tout de même de concilier la vision de Lavoisier avec celle de Stahl. Les quatre éléments ne seront définitivement balayés que grâce à la décomposition de l'eau. Bien que l'expérience ait déjà été faite par l'Anglais Henry Cavendish, Lavoisier décide de la répéter devant le roi, un ministre, des académiciens… Puis, deux ans plus tard, il recommence. Lors d'une expérience solennelle de deux jours, il décompose l'eau puis en effectue sa synthèse. Grâce à cette démonstration spectaculaire, presque théâtrale, Lavoisier recueille l'adhésion de nombreux chimistes à sa théorie. Cet épisode marque la fin du phlogistique.

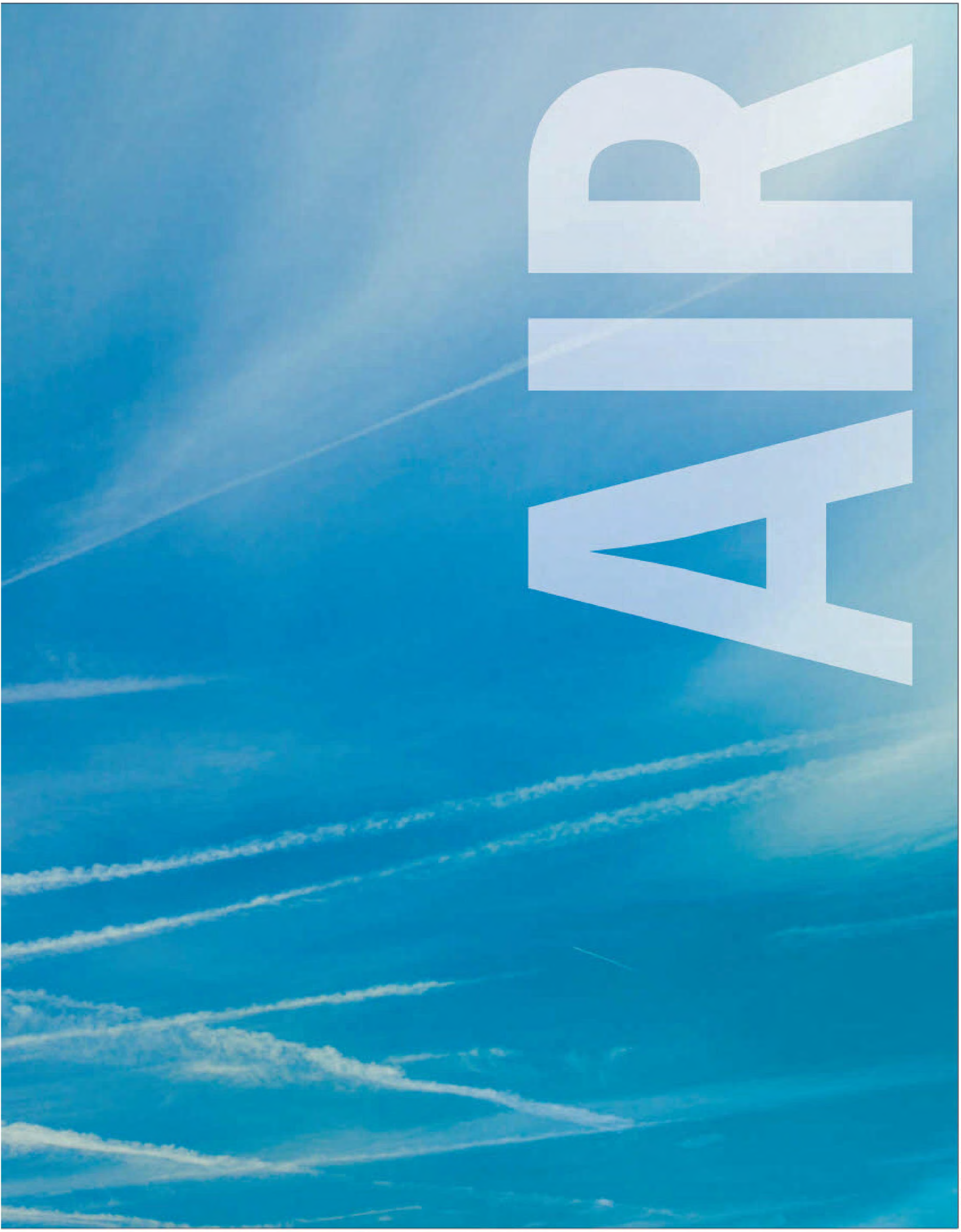
Et la naissance du calorique?

Oui, en effet. Pour Lavoisier, la chaleur reste un fluide qui met les corps à l'état gazeux. Il soutient que tous les corps de la nature sont plongés dans ce fluide, qu'il appelle calorique, qui pénètre dans les intervalles entre les molécules. En s'immisçant entre les molécules, le calorique exerce sur elles une force répulsive, ce qui a pour conséquence l'évaporation du corps. D'ailleurs, explique-t-il, lorsqu'on chauffe les corps, leur volume a tendance à augmenter, ce qui prouve qu'ils ont absorbé du calorique. Ainsi, en 1787, Lavoisier considère le calorique comme un élément. A ce titre, il ne peut ni être créé, ni disparaître. La théorie du calorique a connu un succès assez durable : elle fournit notamment le cadre théorique des travaux de Sadi Carnot, le père de la thermodynamique. En 1824, ce militaire de 27 ans publie un ouvrage, *Réflexions sur la puissance motrice du feu*, dans lequel il jette les bases d'une nouvelle science. Il meurt du choléra huit ans plus tard, mais ses idées sont reprises et complétées par Joule, Clausius, Kelvin… Les physiciens viennent de comprendre l'irréversibilité des transformations – à l'origine du second principe de la thermodynamique : de la même manière que la puissance d'une machine ne peut dépasser une certaine limite, une partie de l'énergie est dégradée en chaleur qui ne peut être conservée. La science qui se développe pendant tout le XIXe finira par enterrer le calorique. Le feu perd alors son statut d'élément.

PROPOS RECUEILLIS PAR AZAR KHALATBARI

En 1665, le jésuite allemand Athanasius Kircher publie l'un des premiers ouvrages de géologie, *Mundus subterraneus*. Il représente ici la Terre vue en coupe transversale, avec un feu central et des feux latéraux aboutissant aux cratères des volcans.

Rayons cosmiques, molécules exhalées par les forêts, poussières volcaniques… les chercheurs épient l'atmosphère afin d'anticiper les mutations du climat. Et repoussent l'horizon jusqu'aux profondeurs du Cosmos, où rugissent des vents supersoniques.



TIM GRAHAM / GETTY IMAGES

Comment la forêt s'adapte-t-elle au changement climatique ? En Provence, les échanges entre canopée et atmosphère sont scrutés au microgramme près.

Une grosse bouffée de molécules

Reportage à l'Observatoire de Haute-Provence
AZAR KHALATBARI
Photos VO TRUNG DUNG/LOOK AT SCIENCES POUR SCIENCES ET AVENIR

Une poignée de coupoles éclatantes émergent de la colline boisée. Haut lieu de l'astronomie, l'Observatoire de Haute-Provence (OHP) connaît régulièrement des heures de gloire. Ce fut notamment le cas en 1995, quand la première planète extrasolaire y fut observée. Reste que, depuis trois ans, les astres ne sont plus les stars exclusives du lieu… De drôles d'instruments ont pris place à côté des télescopes. Leur mission : suivre les subtils changements de notre atmosphère, vaste milieu en équilibre complexe et fragile. Un cocon d'une centaine de kilomètres d'épaisseur qu'il faut étudier à différents niveaux, et notamment aux basses altitudes.

Car l'air que nous respirons reçoit toutes les émissions de la biosphère – vie végétale et animale –, outre celles liées à l'activité des bipèdes. Biosphère qui, à son tour, est soumise aux modifications de la composition de l'air, du climat et des activités humaines (évolution des espaces et des pratiques agricoles, aménagement des territoires, etc.). C'est l'une de ces nombreuses boucles de rétroaction – lorsque l'effet influe sur la cause – bien connues des climatologues.

« Notre but est de comprendre les impacts spécifiques de la canopée forestière sur ce type de rétroactions », explique Juliette Lathière, chargée de recherche CNRS au laboratoire des Sciences du climat et de l'environnement (LSCE – CEA/CNRS/université de Versailles-Saint-Quentin), qui coordonne le projet Canopée. Financé par l'Agence nationale de la recherche, il est dédié aux interactions entre la biosphère terrestre et la chimie atmosphérique, et plus particulièrement aux processus chimiques se déroulant au sein du couvert forestier.

Canopée s'inscrit dans un programme plus ambitieux, Charmex (Chimie des gaz et des aérosols en Méditerranée), vaste volet du chantier Méditerranée initié par l'Insu (Institut national des sciences de l'Univers, CNRS). Il a pour objectif de dresser le bilan et d'anticiper l'évolution de l'environnement atmosphérique du bassin méditerranéen et de ses impacts sur le climat régional et la qualité de l'air. Canopée tente de répondre à plusieurs questions qui se posent encore sur les échanges entre le végétal et l'atmosphère. Car le vivant modifie la composition de l'air que nous respirons : s'il y puise le CO_2 et rejette l'oxygène, il génère en outre une foule de molécules complexes qui lui apportent leur grain de sel.

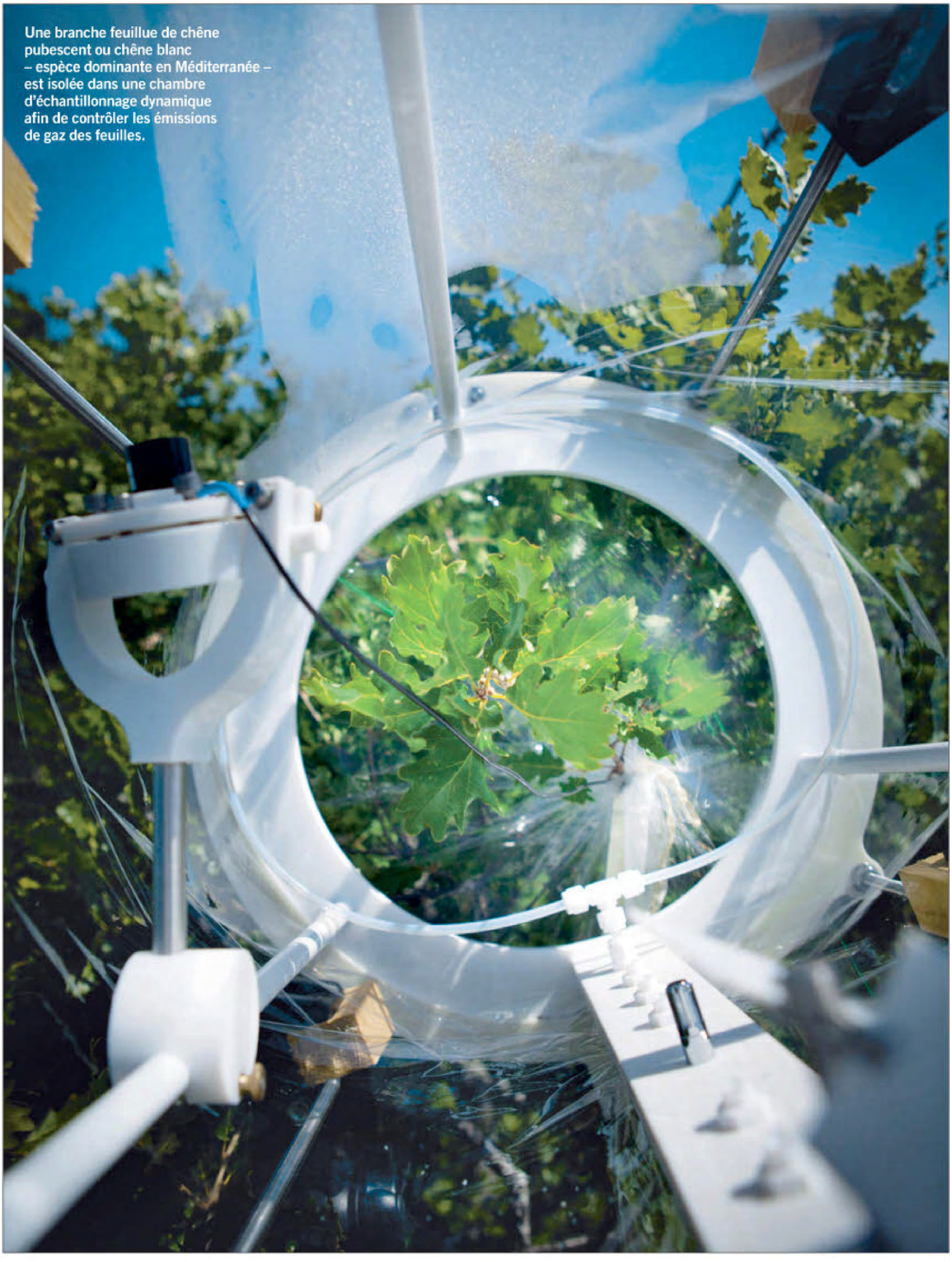
Mécanique poético-scientifique

Pour atteindre la parcelle dédiée aux échanges entre la forêt et l'atmosphère, il faut emprunter un sentier que traversent parfois couleuvres et lézards. Au sommet de la colline – 700 mètres à peine –, l'air est doux, et les rayons du soleil se fraient un passage à travers les feuilles dentelées du chêne blanc. L'espèce est ici chez elle. Une aubaine pour les chercheurs. Pour étudier les émissions de composés par les plantes et leur rôle dans la chimie atmosphérique, l'O3HP (Oak Observatory at OHP), plateforme expérimentale de l'INEE (Institut écologie et environnement du CNRS), offre un cadre privilégié.

Une petite mécanique poético-scientifique a été installée pour surveiller cette essence dominante : au sommet de la canopée, une cloche transparente enclot la branche à étudier. A l'intérieur, les pales d'un petit moulin brassent l'air autour des feuilles duveteuses. *« Il s'agit d'une chambre d'échantillonnage dynamique »*, précise Anne-Cyrielle Genard Zielienski, doctorante à l'université d'Aix-Marseille. Une merveille d'inventivité et de simplicité, que l'on peut transporter de branche en branche.

L'installation se détache sur l'azur du Midi, et les parois en Téflon transparent laissent entrevoir au loin le paysage à perte de vue. L'objectif est de piéger les composés gazeux émis par les feuilles pour les analyser et suivre leur évolution. Car le végétal, selon l'environnement dans lequel il se développe (température, rayonnement, pluviométrie, humidité, etc.), émet plus ou moins de gaz… qui influencent la subtile chimie atmosphérique. Leur nom générique : COVB, pour composés organiques volatils biotiques, plusieurs milliers de molécules dont les plus connues sont l'isoprène et les ●●●

Sur l'ozone : www2.ademe.fr, mots clés : impacts des COV



Une branche feuillue de chêne pubescent ou chêne blanc – espèce dominante en Méditerranée – est isolée dans une chambre d'échantillonnage dynamique afin de contrôler les émissions de gaz des feuilles.

1

❶ La respiration humaine, émettrice de CO_2, fausserait les mesures réalisées sur la parcelle dédiée à l'étude des échanges forêt/atmosphère, d'où un accès réglementé. ❸ Pour simuler le comportement d'une forêt soumise à une pluviométrie de 30 à 40 % inférieure à celle d'aujourd'hui, comme le prévoient les scénarios des climatologues, les chercheurs de l'OHP prélèvent des échantillons d'air au sommet des arbres. ❷ Ils sont soigneusement étiquetés avant d'être transportés pour analyses.

2

3

●●● terpènes. Antioxydantes, aromatiques, antifongiques… Toutes sont indispensables à l'arbre et lui permettent d'interagir avec son environnement. Mais une fois lâchés dans l'air, il ne faut aux COVB que quelques minutes à quelques heures – leur durée de vie dans l'atmosphère – pour réagir et entrer en jeu dans la composition chimique de l'atmosphère.

Et le devenir de ces composés reste encore incertain : ils s'immiscent dans les réactions chimiques pour former des mélanges inattendus, participent à la formation d'ozone troposphérique (celui que nous respirons) et de particules en suspension – les fameux aérosols, complexes à modéliser – ou encore retardent ou accélèrent certaines réactions. L'isoprène, par exemple, est produit en grande quantité par le chêne blanc. *« Nous savons qu'il intervient dans le cycle de l'ozone troposphérique, pas celui de la haute atmosphère qui nous protège des rayons UV du soleil, mais aux basses altitudes »*, raconte Anne-Cyrielle Genard Zielienski *(lire l'encadré ci-contre)*.

Le chêne pubescent – de son nom savant *Quercus pubescens* – a toujours existé dans la région, mais il pourrait changer de comportement si les projections des climatologues venaient à se confirmer. Les conclusions des rapports du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) soulignent notamment que d'ici un siècle, la pluviométrie en Méditerranée diminuera de 30 %. Et nul ne sait dans quel sens ce stress hydrique va influer sur les émissions de la végétation, comment le sol va s'adapter et quelle étrange chimie s'établira au-dessus de nos têtes…

Couche d'ozone à tous les étages

L'ozone (O_3) est un composé omniprésent dans l'atmosphère qui provient de l'addition d'un atome d'oxygène (O) avec une molécule de dioxygène (O_2). Dans la stratosphère – entre 15 et 20 km d'altitude –, l'oxygène atomique provient de la dissociation d'une molécule de dioxygène sous l'effet des UV. Par association de dioxygène et d'oxygène se forme ensuite la fameuse « couche d'ozone » qui fait office de bouclier contre les rayons solaires les plus néfastes. Certains composés émis par l'activité humaine comme les CFC (chlorofluorocarbures) réagissent avec l'ozone stratosphérique et le détruisent. Cette protection naturelle ainsi fragilisée pourrait participer à l'augmentation du nombre de cancers de la peau.

Dans la troposphère, l'ozone devient un polluant. A ce niveau, l'atome d'oxygène naît de la dissociation, sous l'action de la lumière, des oxydes d'azote NOx et des composés organiques volatils (COV) issus des émissions des automobiles ou de l'industrie, ainsi que des activités naturelles (plantes, sols…).

L'ozone, dans la troposphère, est sans cesse produit et détruit. L'équilibre établi dépend des molécules présentes et de leur concentration. Outre ses effets sur la santé (problèmes respiratoires chez les personnes sensibles), l'ozone, gaz corrosif, altère les matériaux et détériore la végétation. C'est aussi un gaz à effet de serre participant au réchauffement global.

Alors, à l'observatoire de Haute-Provence, la création en juillet 2009 de l'O3HP, sous la direction de Thierry Gauquelin, professeur à l'IMBE, s'inscrit dans une volonté d'anticiper et de comprendre les adaptations de la forêt méditerranéenne au changement climatique.

La contribution des feuilles mortes

Au cœur de ce lieu, dès la moindre goutte de pluie, une zone de 300 mètres carrés peut être entièrement recouverte en quelques minutes. *« Nous pouvons imposer à cette surface de forêt une réduction de 30 % des précipitations en moyenne, ce qui correspond aux projections futures décrites dans les rapports du Giec »*, explique Jean-Philippe Orts, écologue, qui ausculte les moindres tressaillements de la forêt. De drôles de ceintures colorées entourent les troncs pour suivre la croissance des arbres. Quant aux 64 piquets rouges disséminés sur la parcelle, ils sont autant de capteurs qui mesurent la résistivité électrique et permettent d'établir une tomographie du sous-sol pour visualiser l'état de saturation des terrains jusqu'à huit mètres de profondeur.

Pendant ce temps, à nos pieds, le sol fait lui aussi l'objet de toutes les attentions. Virginie Baldy, maître de conférence à l'université d'Aix-Marseille, a installé plus de 1 800 litterbags contenant chacun 10 grammes de feuilles mortes (litière) provenant de différentes espèces végétales. Il s'agit d'observer la vitesse de décomposition de la litière

« Dans cette parcelle, nous sommes au cœur de la Méditerranée du futur ! »

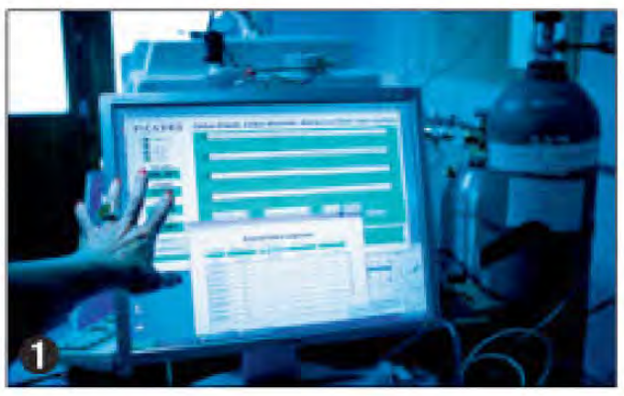
en fonction de ce mélange. Car la diversité des espèces favorise la dégradation de la matière. Les feuilles mortes tombées naturellement au sol sont elles aussi récupérées, puis séchées et pesées pour que leur contribution au bilan de carbone global du cycle ne soit pas oublié. Une forêt suivie, mesurée et calibrée ! *« Nous sommes, dans cette parcelle, au cœur de la Méditerranée du futur !* reprend Jean-Philippe Orts. *Nous comparons toutes les mesures avec celles de la zone voisine, non recouverte, qui représente la forêt d'aujourd'hui. »*

Le vrai QG : un camion laboratoire

A deux pas, dans une petite baraque en dur soumise en continu au ronronnement des machines, Sauveur Belviso, chargé de recherche CNRS au LSCE, casque sur les oreilles, garde l'œil rivé sur les écrans. Il suit des composés devenus classiques, comme les gaz à effet de serre : dioxyde de carbone, méthane, vapeur d'eau. Mais le composé fétiche de Sauveur Belviso, c'est le COS, l'oxysulfure de carbone. Il est absorbé en quantités microscopiques par la plante et se mesure en parties par trillion, soit 10^{-12} molécules par molécule d'air, c'est-à-dire qu'il est environ un million de fois moins abondant que le CO_2 troposphérique. D'où la nécessité, pour mesurer de si petites quantités de gaz, d'une batterie d'instruments complexes. Il faut pour cela concentrer le contenu en COS d'un demi-litre d'air à l'intérieur d'un tube capillaire à la température de -165 °C, puis injecter ce concentré dans un chromatographe en phase gazeuse.

« C'est le plus inerte des composés soufrés gazeux naturels, un composé que les plantes assimilent et transforment en matière organique soufrée. Les plantes assimilent donc du soufre à la fois par les racines (sous forme de sulfates) et les feuilles (sous forme de COS et d'hydrogène sulfuré, H_2S) », raconte Sauveur Belviso.

Lui aussi « puise » dans l'air de la chambre d'enfermement de la branche de chêne, de jour comme de nuit, car il s'interroge sur la capacité de la plante à absorber le COS en l'absence de lumière. Cette étude permettra de mieux évaluer le rôle que joue la végétation terrestre dans le budget global de ce gaz, un budget particulièrement déséquilibré puisque la totalité des sources ne suffit pas à compenser l'ampleur des puits. *« A ce rythme, l'atmosphère se serait vidée de son contenu en COS en quelques années, ce que les observations atmosphériques réfutent »*, raconte Sauveur Belviso. ●●●



❶ Les analyses sont réalisées dans une camionnette proche. ❷ Des capteurs analysent tous les paramètres de la parcelle. ❸ Les données sont recueillies en continu, afin de pouvoir les comparer avec celles obtenues lorsqu'on simule une baisse de la pluviométrie.

●●● Mais regardons à nouveau en l'air… Le chêne peut bien émettre ses bouffées de gaz, encore faut-il les détecter, les quantifier et s'interroger sur leur devenir : s'échappent-elles toutes de la canopée ? Où réagissent-elles ? Avec quelles autres espèces se mélangent-elles ? Pour répondre à toutes ces questions, les équipes participant au projet ont, plusieurs mois avant la campagne de mesures, adapté et calibré leurs différents systèmes d'analyse afin de pouvoir mettre en place la stratégie expérimentale adaptée à leurs objectifs scientifiques. Sur le terrain, cela se traduit par un dédale de tuyaux, piquets et mâts parcourant la forêt et convergeant vers la station d'analyse, le vrai QG : un camion laboratoire rempli d'instruments sophistiqués, devant lequel une bâche tendue joue les auvents.

Là, à l'abri du soleil qui tape fort dès le matin, on discute des résultats. *« Actuellement, le spectromètre de masse est branché via une ligne de prélèvement sur la sortie de la chambre d'échantillonnage dynamique, ce qui nous permet de suivre en temps réel les composés émis par les feuilles de la branche »*, explique Valérie Gros, chargée de recherche au LSCE. Dans le camion, Cerise Kalogridis, doctorante à l'université d'Orsay, est aux manettes. Ingénieure de formation, elle manie à la perfection chromatographe en phase gazeuse et spectromètre de masse. Deux appareils sophistiqués qui, il y a quelques années à peine, auraient occupé chacun une pièce entière. Aujourd'hui, ils se rangent tous deux à l'arrière du camion. Leur fonction : identifier et mesurer la quantité des différentes molécules contenues dans l'air pris à 2 et 10 mètres d'altitude. Les écrans clignotent et les courbes défilent. Un pic apparaît : c'est l'isoprène qui pointe son nez. La plante en a émis une plus grosse bouffée que ces derniers jours. Normal, le soleil s'est montré généreux toute la journée. *« L'augmentation de température et une plus grande activité photosynthétique favorisent les émissions de COVB »*, explique Bernard Bonsang, directeur de recherche au LSCE. A cette part biotique, il convient évidemment d'ajouter les composés organiques volatils anthropiques.

Les écrans clignotent, les courbes défilent. Un pic apparaît : c'est l'isoprène qui pointe son nez

« Pour l'heure, les COV biogéniques restent dix fois plus importants à l'échelle du globe, mais la source anthropique doit également être surveillée, car elle est majoritaire dans les villes et peut être à l'origine du pic d'ozone observé près des zones urbaines en période estivale », précise Valérie Gros. Une fois dans l'air, l'isoprène ne survit que quelques heures, mais sa courte vie sera riche en rebondissements. Bien comprendre son devenir nécessitera encore un long et passionnant travail d'investigation. ■

Des gouttelettes issues des profondeurs du Cosmos…

Les rayons cosmiques contribuent-ils à la formation des nuages ? Au Cern, l'expérience Cloud s'attache à vérifier cette hypothèse majeure pour la compréhension du climat.

Comment se forment les nuages ? Cette question d'apparence poétique fait depuis quelques années l'objet d'expériences et de débats enflammés. D'autant qu'ils semblent jouer dans le réchauffement climatique un rôle particulièrement important, mais complexe, qui a précisément été étudié au cours des dernières décennies. *« Tout dépend de l'altitude à laquelle ils se situent*, résume Paolo Laj, directeur du laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'environnement, à Grenoble. *Ceux qui sont dans la troposphère (1) ont plutôt un effet refroidissant : leurs multiples gouttelettes réfléchissent la lumière vers l'espace et abaissent ainsi la température dans les basses couches.* » Un effet refroidissant ? Il devient urgent d'élucider ce qui favorise leur formation…

À l'origine des nuages, il y a de petites particules dont la taille varie de quelques dizaines à quelques centaines de nanomètres : les noyaux de condensation. Et à l'origine de ces noyaux : des nanoparticules inférieures à 1 nanomètre et provenant de la condensation de gaz en solides ou en liquides – le phénomène de nucléation. Toutes ces particules ne seront pas incorporées au futur nuage. Le moindre changement brusque de température peut en effet les faire disparaître et revenir à l'état gazeux. Mais celles qui parviennent à « tenir » quelques jours grossissent pour atteindre une taille comprise entre 80 et 200 nanomètres… et finir en nuage.

Jusqu'à il y a encore une décennie, les chercheurs pensaient connaître l'origine de ces nucléations : des vapeurs d'acide sulfurique, d'ammoniac et d'eau, qui existent dans l'air en quantité infime et forment de minuscules noyaux de condensation. Mais d'autres processus, naturels eux aussi, pourraient favoriser la nucléation à l'origine des particules. Suspects numéro un : les rayons cosmiques.

Ces particules subatomiques, dont on célèbre cette année le centenaire de la découverte, sont émises au cours des événements les plus violents de l'Univers, l'explosion d'une étoile en fin de vie, par exemple. Leur énergie est telle qu'elles parviennent jusque dans la haute atmosphère terrestre. Là, elles bombardent les atomes des molécules d'oxygène, d'azote et d'hydrogène qui forment notre air, les brisent et les transforment à leur tour en projectiles. Ainsi se forme une cascade de rayons cosmiques primaires – fabriqués dans l'espace – et secondaires – issus de la fragmentation des atomes de l'air… qui pourraient ainsi générer des noyaux de condensation.

Le flux de rayons cosmiques ne dépend pas des émissions humaines ; il varie en fonction de l'activité solaire. Ces particules électriquement chargées qui voyagent à travers l'espace interstellaire peuvent notamment, à l'approche de notre Système solaire, être déviées par l'enveloppe magnétique du Soleil, l'héliosphère. Ainsi, en période de faible activité ●●●

Chambre de l'anneau PS du Cern, le synchrotron à protons où se déroule l'expérience Cloud.

MAXIMILIEN BRICE/CERN

●●● solaire, la Terre reçoit davantage de rayons cosmiques. Les différentes observations confirment cette corrélation. Reste à savoir si ces rayons cosmiques peuvent réellement être à l'origine de la formation des nuages et s'ils constituent le chaînon manquant qui mène du Soleil au climat. Car s'ils interviennent, compte tenu du rôle refroidissant des nuages, un Soleil calme serait propice à la formation de nuages et contribuerait au refroidissement de l'atmosphère. Ce qui impliquerait que les éléments naturels pourraient intervenir au même titre que l'homme.

C'est ce que l'on cherche à savoir au Cern, temple de la physique des hautes énergies, qui consacre aux relations entre rayons cosmiques et nuages un programme baptisé Cloud (pour Cosmics Leaving Outdoor Droplets, « rayons cosmiques produisant des gouttelettes extérieures »). Pour cette expérience, un mélange de gaz très représentatif de notre atmosphère a été introduit dans une chambre hermétique soumise à un faisceau de protons censés simuler le bombardement de rayons cosmiques pendant une phase calme du Soleil. Les résultats, publiés dans *Nature* du 25 août 2011, montrent que l'impact des rayons cosmiques favorise la nucléation. « *Un résultat intéressant*, commente Paolo Laj. *Mais il s'agit de particules de taille inférieure à 1 nanomètre, et Cloud n'a pas observé leur évolution en particules précurseurs de nuages. Il ne montre pas non plus de lien direct entre ces derniers et les rayons cosmiques.* » Il n'en fallait pourtant pas plus pour que les climato-sceptiques pointent le rôle du Soleil dans le réchauffement climatique. Ils ont ainsi promptement utilisé ces premiers résultats pour minimiser l'action de l'homme sur l'atmosphère, et considérer le contrôle des gaz à effet de serre comme un exercice inutile. **AZAR KHALATBARI**

1. Couche la plus basse de l'atmosphère, entre le sol et une quinzaine de kilomètres d'altitude.

L'exoplanète HD209458b, la plus ventée découverte à ce jour, orbitant autour de son étoile. Vue d'artiste.

ESA

Ces vents qui rugissent à 10 000 km/h

OURAGANS COSMIQUES. Avec des vents dépassant parfois les 200 kilomètres à l'heure, les agitations de l'atmosphère terrestre ont parfois des effets dévastateurs. Mais il y a bien pire dans le Système solaire : l'exemple de tempête planétaire le plus frappant est sans doute celui de la grande tache rouge de Jupiter. L'atmosphère d'hydrogène et d'hélium de cette planète gazeuse connaît en effet un cyclone sans fin, dont la taille engloberait plusieurs fois la Terre. Au bord du cyclone, des vents de 600 kilomètres à l'heure soufflent en permanence !

Mais plus violents encore sont ces déplacements d'air – en fait, des mouvements de gaz – qui, beaucoup plus loin de nous, peuvent atteindre des vitesses supersoniques. Parmi les centaines d'exoplanètes repérées par les astronomes depuis une quinzaine d'années, certaines présentent la particularité de tourner très près de leur étoile et d'être en rotation synchrone avec elle. La période de rotation de la planète étant synchronisée avec sa période de révolution, celui-ci présente toujours la même face à son étoile. Ce qui crée un puissant contraste entre le côté éclairé en permanence et celui qui reste dans l'ombre… Et engendre des différences de température colossales : jusqu'à 1 000 degrés entre les deux faces dans la haute atmosphère. Une différence qui, selon les modèles prédictifs, peut déclencher des vents puissants. En 2010, une délicate – et unique à ce jour – observation réalisée au Very Large Telescope de l'Eso (European Organisation for Astronomical Research in the Southern Hemisphere), au Chili, a permis de mesurer la vitesse des vents sur l'une de ces planètes lointaines, en l'occurrence HD209458b. Des courants de monoxyde de carbone qui rugissent dans sa haute atmosphère, de la partie éclairée vers sa « face cachée », et se déplacent à près de 10 000 kilomètres à l'heure… Une vitesse vraisemblablement supérieure à celle du son à cette altitude. Eole en est encore tout décoiffé !

PHILIPPE PAJOT

http://www.nature.com/nature/journal/v465/n7301/full/nature09111.html

Du choc des terres jaillit l'oxygène

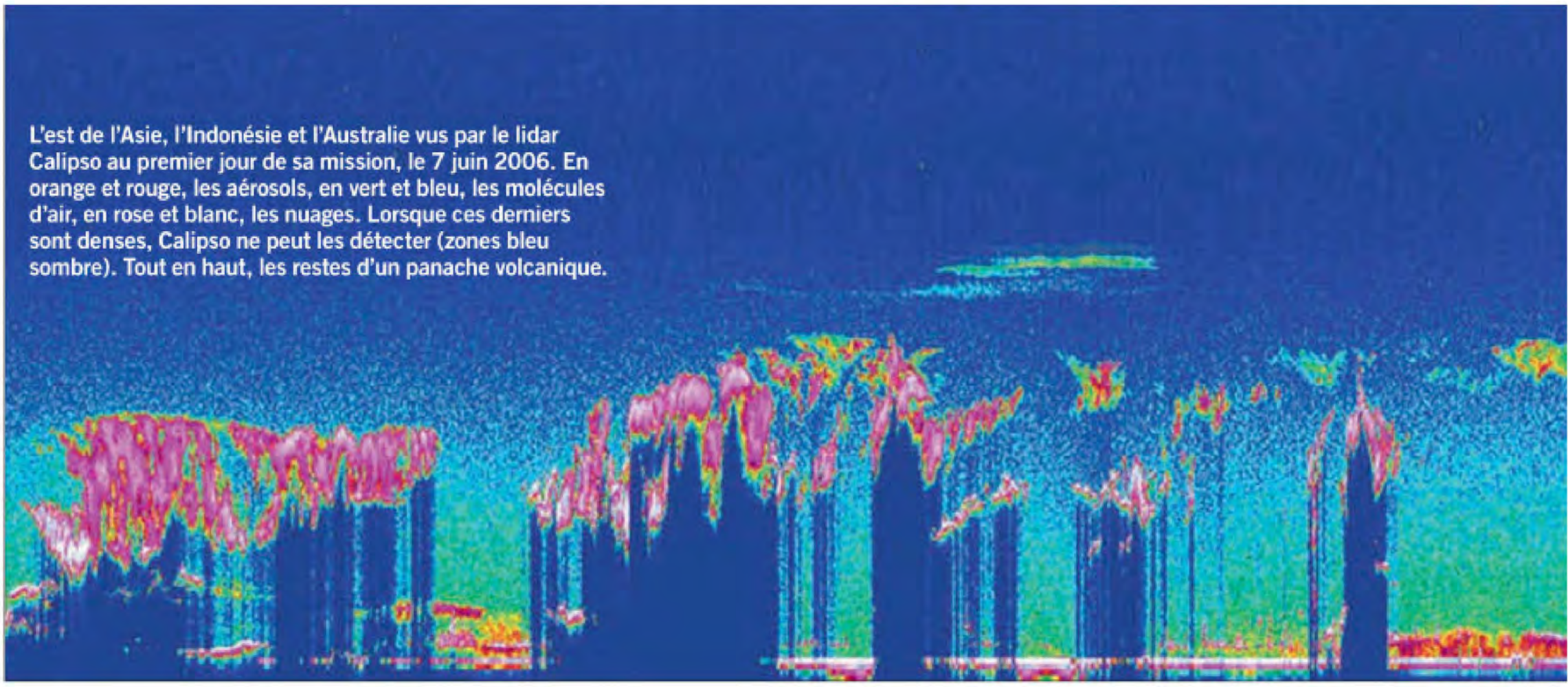
La composition de l'atmosphère terrestre s'est brusquement modifiée voilà deux milliards d'années, permettant l'explosion de la vie. En cause : la photosynthèse, mais aussi la tectonique des plaques.

C'est un événement de l'histoire de la Terre que les géophysiciens ont surnommé « la catastrophe de l'oxygène ». Dans le langage scientifique, le mot n'a pas de connotation négative, et pour cause : cette catastrophe-là a tout simplement porté la vie. Un phénomène brutal, grandiose et global, survenu lorsque la planète avait environ 2,1 milliards d'années – la date de cette grande oxydation est encore l'objet d'âpres discussions. En quelques centaines de milliers d'années, temps très court à l'échelle des âges géologiques, la composition chimique de l'atmosphère a « brusquement » changé, jusqu'à compter 21 % de dioxygène, taux inchangé jusqu'à aujourd'hui. Comment un tel bouleversement a-t-il pu survenir?

Longtemps, les chercheurs ont été persuadés que cette richesse en oxygène était liée à l'activité des cyanobactéries, ces premiers micro-organismes capables de photosynthèse. En fixant le carbone du CO_2, alors abondant dans l'atmosphère, grâce à l'énergie apportée par la lumière, ils sont en effet capables de synthétiser des molécules complexes, comme le sucre, en libérant de l'oxygène. Or, ce gaz de dioxygène est à l'origine d'une foule de réactions d'oxydation, depuis la combustion jusqu'à l'oxydation lente des métaux. De fait, l'atmosphère s'est peu à peu enrichie en gaz corrosif, qui a d'ailleurs dû finir par provoquer une hécatombe chez les micro-organismes! Les roches – aujourd'hui quasiment introuvables – qui affleuraient à cette époque portent encore la marque de cet événement majeur : à partir de 2,1 milliards d'années, le fer qu'elles comportent est oxydé, alors que c'est du fer non oxydé que renferment celles formées antérieurement…

Cependant, la question de la quantité d'oxygène produite taraude encore les géochimistes. L'activité photosynthétique des bactéries suffit-elle à rendre l'atmosphère oxique à hauteur de 21 %? Non, répondent-ils. La tectonique des plaques joue aussi un rôle important dans sa composition chimique. Ian Campbell et Charlotte Allen, deux géologues australiens de l'université de Canberra, ont mis en corrélation production d'oxygène et collision entre continents. Ces épisodes tectoniques engendrent des chaînes de montagnes jeunes. Dans le même temps, l'érosion s'accélère, favorisée par les eaux qui dévalent les pentes de ces nouvelles montagnes. Une grande part des minéraux se retrouvent dans l'océan par le biais des fleuves charriant les eaux de pluie, avant de nourrir les organismes planctoniques qui prolifèrent et constituent une nourriture de choix pour les micro-organismes photosynthétiques. En outre, toujours à cause de l'érosion et des eaux de ruissellement, le carbone se retrouve enfoui au fond des océans et ne peut se combiner avec l'oxygène pour former du gaz carbonique. L'oxygène reste donc dans l'atmosphère, sous forme de gaz… Et en grande quantité. AZAR KHALATBARI

Si des cynaobactéries comme celles-ci ont joué un rôle dans la formation de l'oxygène, le choc des continents en serait aussi responsable.



L'est de l'Asie, l'Indonésie et l'Australie vus par le lidar Calipso au premier jour de sa mission, le 7 juin 2006. En orange et rouge, les aérosols, en vert et bleu, les molécules d'air, en rose et blanc, les nuages. Lorsque ces derniers sont denses, Calipso ne peut les détecter (zones bleu sombre). Tout en haut, les restes d'un panache volcanique.

Calipso, le lidar qui balaie les poussières atmosphériques

Depuis quelques années, une mission d'observation traque les nuages de particules qui voyagent au-dessus de nos têtes. Objectif : en mesurer l'impact sur la santé publique et le réchauffement climatique.

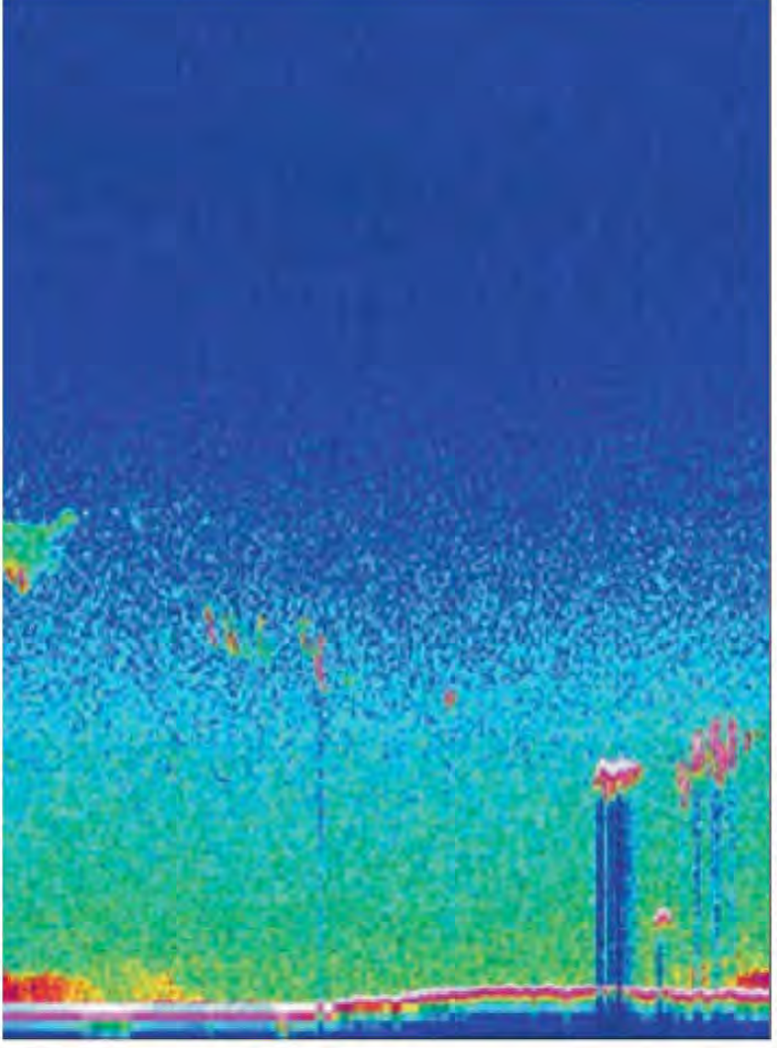
Explorer intimement l'atmosphère terrestre, comprendre comment interagissent nuages, rayonnement solaire et fines poussières en suspension, suivre le voyage des panaches de volcan et les suies des feux de forêt… Toute cette somme de connaissance est aujourd'hui à portée de regard. Au-dessus de nos têtes, un « train » de six satellites décortique en effet l'enveloppe de la Terre, traquant les nuages les plus fins et les plus élevés, révélant les pollutions des villes et suivant à la trace les tempêtes de sable. C'est Calipso (Cloud Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations).

La grande nouveauté de ce programme lancé par la Nasa et le Cnes en 2006, c'est qu'il utilise un lidar en haute altitude : 705 kilomètres au-dessus de la Terre. L'appareil envoie tous les 330 mètres des impulsions laser. En fonction de la densité des obstacles rencontrés – gouttes d'eau, aérosols, etc. –, une partie plus ou moins grande de ces brefs signaux lumineux est renvoyée vers le satellite. *« On obtient ainsi une coupe verticale de la couche d'air d'une résolution de 60 mètres de haut, et ce, à l'échelle du globe. L'atmosphère se dévoile sous un nouveau jour! »*, s'enthousiasme Hélène Chepfer, chercheur au laboratoire de Météorologie dynamique de l'université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris. Depuis sa mise en service, le lidar a réalisé quelque 3,5 milliards de tirs et donné des images de toute beauté. La mission, qui utilise également un satellite radar et trois satellites d'imagerie traditionnelle se suivant à cinq minutes d'intervalle, a déjà fourni plus de 80 téraoctets de données!

Le système révèle une « soupe » de poussières et d'aérosols dans les premières couches de l'atmosphère, des arrivées rares mais brutales de ces poussières dans la troposphère grâce à des phénomènes de convection qui les projettent à de très hautes altitudes, ainsi que la présence de nuages insoupçonnés. Ces poussières et aérosols sont à 90 % d'origine naturelle : particules de sel emportées par le vent sur les océans, grains de sable arrachés aux déserts, poussières expulsées par les volcans. Mais les 10 % restants sont d'origine humaine, et cette part va croissant. Ce sont les suies des incendies de forêt ou du chauffage, les particules émises par les moteurs Diesel, les résidus d'engrais chimiques pulvérisés par les agriculteurs. La composition en est complexe, et les spécialistes constatent même souvent l'existence d'agrégats, un grain de sable servant par exemple de support à une particule de nitrate.

Une « soupe » de particules dont 10 % sont d'origine humaine, une part qui va croissant

Leur devenir dans l'atmosphère est un sujet majeur. D'abord, parce que les enjeux de santé publique sont énormes. Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS), en effet, la pollution atmosphérique en milieu urbain provoque chaque année 1,3 million de décès dans le monde. Ensuite, parce que l'effet de ces particules sur le réchauffement climatique, bien qu'avéré, reste très difficile à mesurer. Les aérosols ont une action contradictoire. *« Par un effet parasol*, explique François Dulac, chercheur au laboratoire des Sciences du climat et de l'environnement (LSCE, Saclay), *ils empêchent le rayonnement solaire d'atteindre le sol. Mais ils troublent aussi la condensation de la*



NASA LANGLEY/IRESEACH CENTER

vapeur d'eau, empêchant la formation de gouttes de pluie. » En général, ces poussières restent confinées dans les basses couches de l'atmosphère. « *Ainsi, Calipso a pu photographier les cendres du volcan Eyjafjöll lors de son éruption en 2010,* souligne Hélène Chepfer, *et établir très vite que ce panache n'entrait pas dans la stratosphère et n'aurait pas d'effet à long terme.* » Il arrive cependant que des poussières volcaniques rejoignent ces hautes couches pour y voyager. Calipso peut alors mesurer le phénomène. Il permet aussi d'ausculter des nuages de basse altitude aux tropiques, et des cirrus formés de particules de glace à très haute altitude sous toutes les latitudes. « *On s'est ainsi aperçu que des nuages d'eau liquide existaient au-dessus des pôles à des températures pourtant inférieures à 0 °C, participant à la rétention du rayonnement solaire et donc à l'effet de serre nécessaire à la vie sur Terre* », poursuit Hélène Chepfer.

Toutes les données récoltées par Calipso permettent d'affiner les prévisions de hausse de la température terrestre. Nuages et aérosols ont en effet sur le rayonnement solaire et son réfléchissement sur la surface terrestre (l'albedo) une influence non négligeable. Prévu pour trois ans, Calipso poursuit imperturbablement sa mission et pourrait atteindre dix ans d'existence, une durée suffisante pour faire abstraction des variations annuelles et mieux comprendre l'évolution à long terme du climat. Son successeur, Earthcare (mission de l'Agence spatiale européenne), se prépare à prendre le relais en 2015. **LOÏC CHAUVEAU**

A la recherche du dépolluant miracle

HABITAT. Si l'on a toutes les raisons de s'inquiéter quant à l'air que nous respirons, il ne faut pas oublier qu'en matière de pollution, l'ennemi est – aussi – intérieur ! Nous passons en moyenne 67 % de notre temps « à la maison », et au total plus de 92 % en lieu clos. Or, la quantité de polluants y est plus élevée qu'à l'extérieur. Accusés ? Le très cancérogène formaldéhyde, présent notamment dans les colles et les peintures, le monoxyde de carbone issu de combustions incomplètes, la fumée de tabac, l'amiante, les toxines émises par les moisissures, les allergènes liés aux animaux et acariens, le radon dans les régions où la radioactivité naturelle est élevée… Et, bien entendu, les composés organiques volatils (COV) – dont le benzène, cancérogène avéré. Ces innombrables polluants sources d'allergies, d'asthme, de cancers, ont aussi parfois des effets neurotoxiques et sur la reproduction. En outre, la plupart du temps à cause d'un appareil de chauffage défectueux, 500 personnes sont intoxiquées chaque année en France par le monoxyde de carbone… Et 90 en meurent.

Pour lutter contre ces dangereux colocataires, le traitement de l'air par photocatalyse (1) semblait promis à un avenir radieux, et de nouveaux appareils n'ont pas tardé à voir le jour. Le principe : adsorber (2) les polluants sur un matériau – le plus souvent du dioxyde de titane – qui les détruit sous l'action de la lumière. Toutefois, en juin dernier, l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur a douché les espoirs de dépollution miraculeuse en publiant un rapport très critique sur ces appareils (3). Non seulement leur efficacité n'est pas prouvée en environnement réel, mais surtout, leur innocuité est loin d'être démontrée. En cassant les polluants, ils peuvent donner naissance à des polluants secondaires plus toxiques. Enfin, la plupart de ces appareils utilisent des nanoparticules de dioxyde de titane… elles-mêmes potentiellement cancérogènes !

Alors, que faire pour combattre la pollution des logements ? Seules deux méthodes ont prouvé leur efficacité. La première : le choix de matériaux plus sains ; depuis janvier 2012, l'indication des émissions de COV dans l'air est obligatoire sur les produits de construction et de décoration. La deuxième : l'aération régulière. Le Centre scientifique et technique du bâtiment vient de développer un boîtier permettant d'évaluer le confinement de l'air à partir de la mesure du dioxyde de carbone (CO_2). Baptisé Lum'air, il passe au rouge lorsqu'il devient urgent d'aérer. Ce système est pour l'instant réservé aux crèches et aux écoles. En attendant sa distribution à plus grande échelle, ouvrons nos fenêtres ! **CÉCILE MICHAUT**

1. Accélération d'une réaction chimique sous l'action d'une source lumineuse.
2. L'adsoption est la fixation de molécules de gaz ou de liquides sur des solides.
3. www.oqai.fr, bulletin n° 4, juin 2012

PLAINPICTURE

Les Européens passeraient plus de 92 % de leur temps en milieu fermé.

L'étude fine des interactions, permanentes, entre le Soleil, la Terre, l'eau et l'atmosphère permet de mieux comprendre le climat et son évolution.

La biosphère sous influences

L'observation a longtemps été le seul moyen de déchiffrer le ciel. L'arrivée des satellites, dans les années 1970, a constitué une révolution puisque les chercheurs ont eu soudain à leur disposition une vision d'ensemble de la planète. Quant aux modèles numériques, nés après la Première Guerre mondiale, ils ont intégré peu à peu dans leurs calculs l'action des nuages, des océans, des glaces de mer, de la végétation et des phénomènes biochimiques. « *Aujourd'hui, pour rendre compte de la complexité du climat, nous devons croiser de plus en plus de résultats de modèles ou d'observations satellitaire touchant la physique comme la chimie de l'atmosphère et des océans…* observe le climatologue Hervé Le Treut, directeur de l'institut Pierre-Simon Laplace. *Cela nécessite à la fois des chercheurs très spécialisés, par exemple en physique du rayonnement ou en mécanique des fluides, mais aussi de faire le lien entre plusieurs domaines. C'est pour cela qu'a été créé l'institut Pierre-Simon Laplace, qui rassemble six laboratoires aux compétences variées.* » Cet institut, basé en Ile-de-France, vient par exemple de montrer, avec des partenaires allemand, norvégien et britannique, que réduire artificiellement la quantité de soleil reçu par la Terre n'empêcherait pas les fortes modifications de précipitations dues au changement climatique.

Mais l'étude du climat s'avère également complexe du fait des échelles considérées. Les grands principes au niveau planétaire sont plutôt bien compris, de même que beaucoup d'aspects des processus locaux, tels que les ondes orographiques – la manière dont les vents s'adaptent aux reliefs – ou la physique des nuages… Malgré cela et l'amélioration continue des mesures, les phénomènes régionaux, l'amplitude des changements, restent difficiles à anticiper. « *Si nous comprenons assez bien les moussons, ou le phénomène El Niño, ils dépendent de trop de facteurs pour que leur évolution soit facilement prévisible* », indique par exemple Hervé Le Treut. De même, certains éléments géographiquement limités, mais dont l'impact climatique est important, comme les calottes glaciaires, doivent être mieux compris. Enfin, l'un des nouveaux défis des sciences du climat est de mieux appréhender les liens entre la physique et le vivant. « *Il y a des compétitions entre espèces, des écosystèmes, une capacité des organismes à s'adapter…* rappelle le chercheur. *Il faut tenir compte de tous ces paramètres pour estimer l'impact réel du changement climatique.* »

CÉCILE MICHAUT

INFOGRAPHIE : MEHDI BENYEZZAR

POUR SCIENCES ET AVENIR HORS-SÉRIE

PROJECTION DE GAZ ET PARTICULES

Panache volcanique (gaz, cendres, bombes)

Nuage pyroclastique

Coulée pyroclastique (cendres, pierres, blocs)

PRÉCIPITATIONS

Formation de gouttelettes autour d'aérosols (nucléation)

Eau en surfusion

Croissance de gouttes ou de cristaux de glace

Pluie

Air chaud

DISPERSION D'AÉROSOLS

Vent

Poussières

FORMATION DES VOLCANS

Cratère

Coulée de lave

Couches de cendres

Cheminée principale

Chambre magmatique

ÉROSION

Précipitations

Roche

Force des vagues

« L'éther fut tour à tour l'air, l'espace, le vide… »

Interview. Le cinquième élément d'Aristote a longtemps permis d'expliquer l'inconnu. Si les travaux d'Einstein l'ont rendu obsolète, les questions qui se posent autour du vide quantique lui redonnent une nouvelle vie.

Aux quatre éléments qui composaient le monde chez Empédocle s'est rapidement ajouté l'éther, décrit par Aristote. Quelle place avait-il ?

Dans la pensée grecque, la Terre et le Ciel formaient deux mondes distincts. La première constituait le monde sublunaire, dont la limite était fixée à l'orbite de la Lune. Le second, le monde supralunaire, qui s'étendait au-delà de notre satellite. Ces deux régions sont loin de partager les mêmes propriétés : dans le monde sublunaire, tout est une composition des quatre éléments, sujets à des métamorphoses, corruptibles au sens où les corps se transforment, meurent… Tandis que le monde supralunaire est entièrement constitué d'éther, inodore et incolore. La perfection caractérise cette sphère supralunaire, où les mouvements ne peuvent être que circulaires, éternels et immuables. L'éther est ce cinquième élément qui compose le monde céleste.

DR

MARC LACHIÈZE-REY
Directeur de recherche au CNRS, laboratoire Astroparticule et Cosmologie, université Paris Diderot.
Auteur de *Au-delà de l'espace et du temps*, Le Pommier, 2008

Marc Lachièze-Rey, *Les Avatars du vide,* Le Pommier/ Le collège de la Cité, 2005

Est-ce une substance, au même titre que les quatre autres ?

Le statut de l'éther a toujours été ambigu, mal défini… C'est un peu le joker de la physique, car son identité a beaucoup évolué ; à chaque fois, cette mutation a correspondu à une crise dans la compréhension du monde. L'éther a tour à tour désigné l'air, l'espace, le vide, ou encore, y compris de nos jours, une hypothétique forme d'énergie qui dilaterait de plus en plus rapidement l'Univers tout entier. Ce que les astrophysiciens ont baptisé énergie sombre *(lire l'encadré p. 46)*. Pourtant, la tentation de caractériser l'éther au même titre que les autres éléments a toujours été présente. Pour Platon, les quatre éléments sublunaires avaient des structures géométriques en forme de polyèdre – les fameux solides de Platon : le tétraèdre (feu), le cube ou hexaèdre (terre), l'octaèdre (air), l'icosaèdre (eau)… Mais l'éther avait une structure à part : c'était un dodécaèdre… La figure géométrique la plus symétrique, celle qui se rapproche le plus de la sphère, synonyme de perfection. Contrairement aux quatre autres éléments, l'éther est transparent, d'où son qualificatif de cristallin.

A quel moment cet éther cristallin change-t-il de statut ?

C'est à la Renaissance que ce monde supralunaire présente les premières failles. Plusieurs observations astronomiques remettent en cause son caractère immuable. En 1572, l'astronome danois Tycho Brahé, observateur hors pair, remarque dans la constellation de Cassiopée une étoile qui devient très brillante. Cet embrasement d'un astre, nous le savons aujourd'hui, correspond à l'explosion d'une étoile en fin de vie, une supernova. Mais à l'époque, l'événement ébranle les représentations cosmiques. Comment ce monde supralunaire « incorruptible » peut-il présenter de telles variations ? Brahé publie alors un livre, *De stella nova*, pour rendre compte de ses observations – ce qui contribuera à remettre en cause la vision d'Aristote… Cinq ans plus tard, en 1577, le passage d'une comète crée une nouvelle polémique : Tycho Brahé observe l'astre avec précision et en déduit qu'elle passe bien au-delà de la sphère de la Lune. Un astre passager qui croise l'orbite des planètes, voilà qui écorne à nouveau la doctrine d'Aristote, pour qui les comètes étaient des phénomènes atmosphériques.

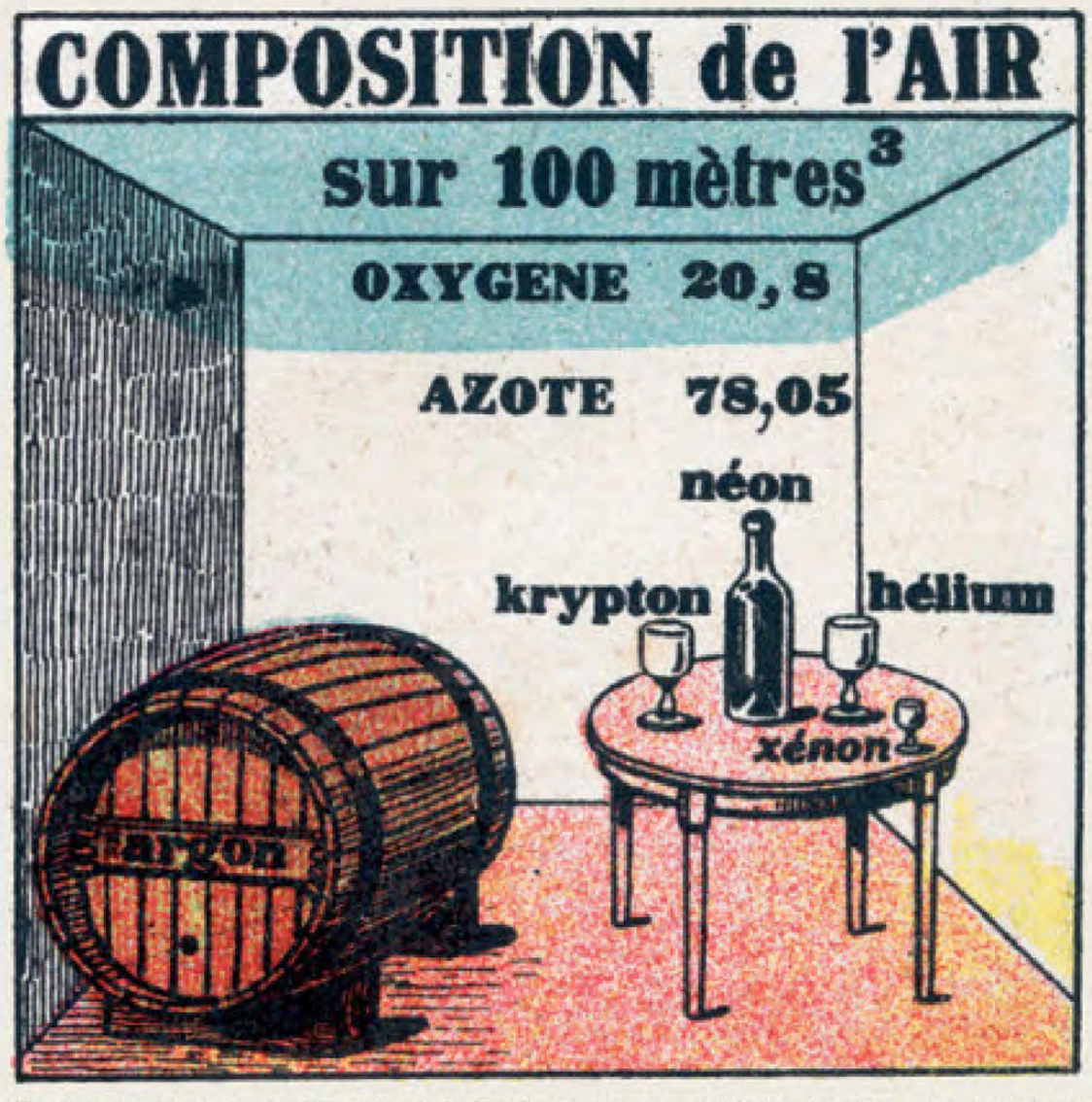
Est-ce alors la fin de l'éther cristallin, immuable et incorruptible ?

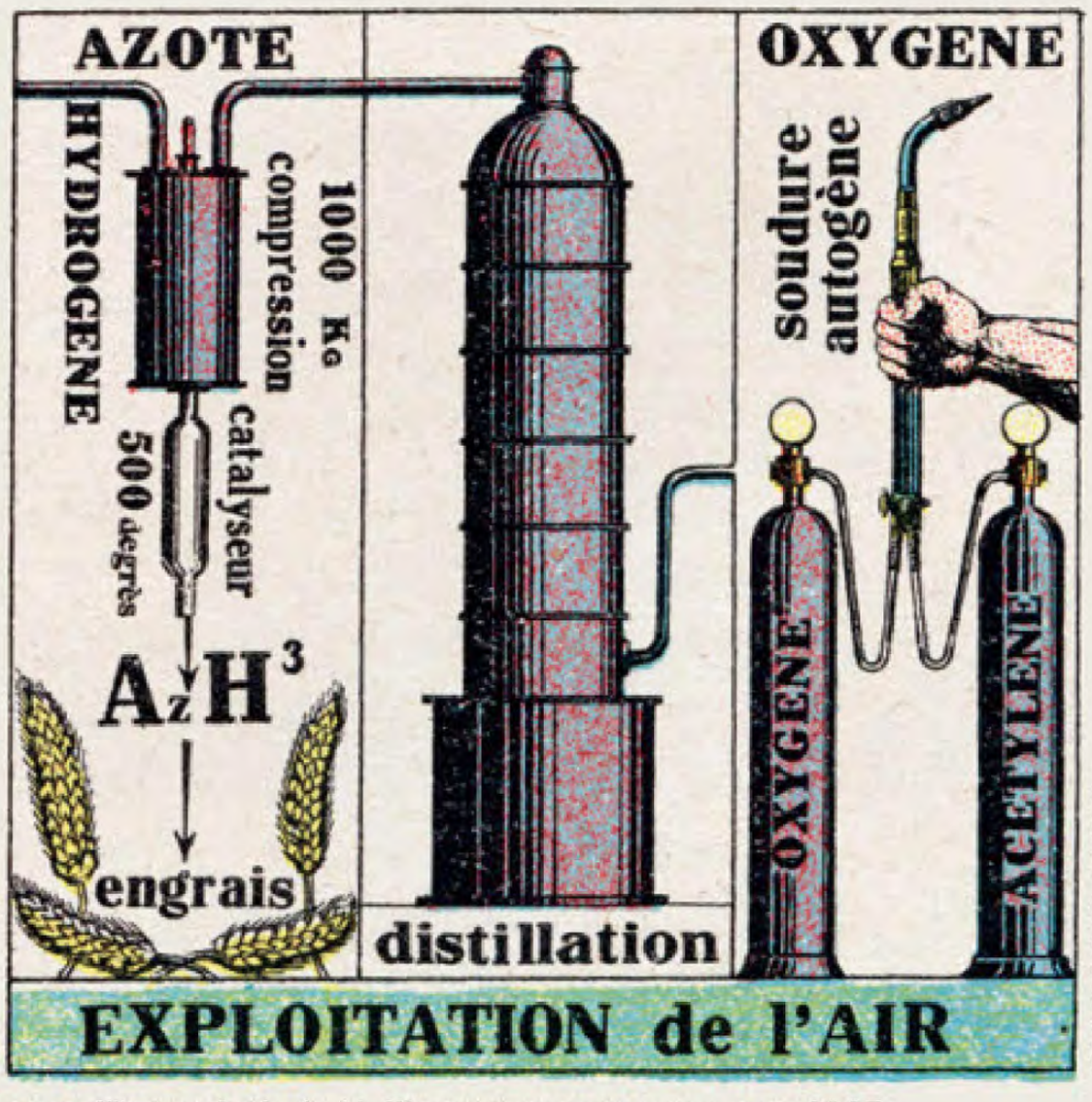
Oui. Tout au long du XVI^e^ siècle, les observations de Brahé, Kepler et Galilée montrent que le monde supralunaire n'est pas autre que celui qui s'étend en deçà de l'orbite de la Lune… D'ailleurs, dès la fin du XVII^e^ siècle, avec Newton, cette distinction disparaît : les mondes sont unifiés et forment l'Uni-vers, avec cette idée d'unité et d'unification. Les lois sont universelles et opèrent dans l'espace et le temps. La substance cristalline, qui offrait un statut à part au monde supralunaire, a bien disparu, mais l'éther renaît de ses cendres sous d'autres formes. Pourquoi ? Parce qu'au cœur du XVII^e^ siècle, la physique est une fois de plus confrontée à deux crises majeures. L'une concerne la lumière et l'autre, la gravitation.

Comment le débat sur la lumière fait-il renaître l'éther ?

C'est la nature de la lumière qui fait débat : est-ce un corpuscule ●●●

L'ESPACE EST REMPLI D'ÉTHER





BIANCHETTI/LEEMAGE - AKG IMAGES

En haut : berger de l'Antiquité. En bas : composition de l'air; son exploitation par l'industrie du froid. Illustrations anonymes, vers 1925.

●●● – comme le soutient Isaac Newton – ou une onde, comme le croit le Néerlandais Christian Huygens ? Pour ce dernier, la lumière est comme les vagues à la surface de la mer. Et de la même manière que les clapotis sont indissociables de l'eau, la lumière correspondrait aux vibrations de l'éther. Un éther qui n'a bien sûr rien à voir avec l'élément imaginé par Aristote. De ce fait, Huygens l'appelle « l'éther luminifère », impalpable, transparent, dont les propriétés se révèlent très difficiles à décrire. Par la suite, les physiciens s'apercevront que les mouvements au sein de l'éther luminifère sont impossibles à déterminer… Mais, en attendant, il se révèle un outil ontologique puissant ; c'est lui qui donne naissance à une notion essentielle de la physique, celle de « champ ». L'Ecossais James Clerk Maxwell présente la lumière comme la vibration d'une entité que l'on peut matérialiser en jetant de la limaille de fer sur une feuille placée au-dessus d'un aimant… Un champ électromagnétique, comme nous l'appelons aujourd'hui.

Au même moment, la gravitation a aussi besoin d'éther ?

Tout à fait. La loi de la gravitation universelle de Newton rencontre un succès immédiat. Elle explique le mouvement des planètes, la ronde de la Terre et la chute des corps. Toutefois, pour que cette force puisse s'exercer à distance, il faut lui imaginer un support, sans quoi cela relèverait du miracle. L'éther gravitationnel se substitue ontologiquement au miracle de l'action à distance… Ce qui crée beaucoup de débats : il est impossible de le définir, ni de décrire ses mouvements. Les critiques se multiplieront : le philosophe Emmanuel Kant et le physicien Ernst Mach, entre autres, remettront en cause l'existence de ce support indéfinissable.

> « Pour que la gravitation universelle ne relève pas du miracle et puisse s'exercer à distance, il a fallu lui inventer un support : l'éther gravitationnel

Quand l'éther sera-t-il enfin abandonné ?

Au début du XX^e siècle, avec Einstein. En fait, le nouveau cadre conceptuel qu'il réussit à construire rend tout simplement l'éther obsolète. La physique n'a plus besoin de son existence, et il devient en quelque sorte une hypothèse superflue. L'éther luminifère, d'abord. En effet, si la lumière est une onde et qu'elle est portée par l'éther, comment expliquer que ce substrat lui-même reste immobile ? Par ailleurs, la règle classique de rajout des vitesses, telle que l'avaient énoncée Galilée et Newton, ne semble pas s'appliquer à la lumière (un homme qui court dans un train a une vitesse *V* pour un autre passager assis dans le train ; mais pour un spectateur sur le quai, il a une vitesse de *V* + la vitesse du déplacement du train). En 1887, Albert Michelson et Edward Morley ont mesuré la vitesse d'un faisceau lumineux dans l'éther supposé dans le sens de rotation de la Terre (le mouvement du globe étant ici l'équivalent de la vitesse du train). Selon la règle galiléenne, elle devait être supérieure à celle du faisceau envoyé dans le sens inverse. Le résultat a confirmé que cette vision galiléenne ne s'appliquait pas à la lumière. Sa vitesse, finie, est une constante absolue : impossible de préciser l'état de mouvement d'un éventuel éther ; impossible de mettre en évidence un vent d'éther. L'expérience avait beau être répétée, le résultat ne différait pas. Autrement dit, si l'éther existait… il était impossible de le mettre en mouvement. Finalement, c'est donc Einstein qui trouve l'audace de déclarer que l'hypothèse est superflue. C'est la relativité restreinte.

Einstein enterre aussi l'éther gravitationnel…

Là aussi, sa démarche est très audacieuse. Dans la conception newtonienne, la gravité est une force qui s'exerce à travers l'espace. Einstein rompt totalement avec cette vision. Sa théorie de la relativité générale assimile la gravitation à la structure même de l'espace-temps, exprimée par sa courbure : il n'est pas nécessaire d'invoquer une action à distance et, de fait, pas besoin d'envisager un support ! La courbure de l'espace-temps remplit finalement le rôle de l'éther gravitationnel.

Si l'on retire la matière, que contient alors l'espace-temps ? A-t-on trouvé un substitut à l'éther qui a persisté pendant près de deux millénaires ?

La question se pose en effet : la relativité générale déclare que la forme de l'espace-temps est déterminée en chaque point par la quantité de

L'ÉNERGIE SOMBRE, UN AVATAR DU CINQUIÈME ÉLÉMENT

Un des problèmes de la cosmologie actuelle est cet étrange constat : l'expansion cosmique s'accélère. Que l'Univers soit en expansion, nous le savions depuis les premières décennies du XX^e siècle grâce aux travaux de Vesto Slipher et d'Edwin Hubble, à l'observatoire du mont Wilson en Californie, et de Georges Lemaître. Mais la gravité devrait la ralentir. Les observations, notamment de supernovae lointaines effectuées par les équipes de Saul Perlmutter ainsi que de Brian Schmidt et d'Adam Riess, ce qui leur a valu le prix Nobel de physique en 2011, nous révèlent au contraire qu'elle accélère !

Quelle en est la cause ? A cette question très actuelle, et non résolue, deux types d'approche. Les uns invoquent une constante cosmologique (initialement introduite par Einstein), l'une des constantes fondamentales de la nature, qui caractériserait la forme (la courbure) de l'espace-temps lorsqu'il ne contient pas de matière : autrement dit, le vide. Depuis presque un siècle, les cosmologues savent que cette « courbure du vide » doit précisément se manifester sous la forme d'une accélération cosmique. D'autres physiciens préfèrent supposer que l'Univers contient une mystérieuse substance accélératrice, qu'ils qualifient d'énergie sombre. Une substance dont l'énergie ou la pression serait négative, ce qui exercerait une sorte de « gravité » répulsive capable de contrebalancer l'attraction gravitationnelle exercée par la matière. Constante cosmologique ou énergie sombre ? Deux avatars de l'éther, dans la physique du XXI^e siècle ?

matière présente, d'une manière qu'exprime l'équation d'Einstein. Quelle serait cette forme en l'absence de matière (ou d'énergie, puisque, depuis Einstein, nous savons qu'il y a une équivalence entre masse et énergie)? Bref, à quoi ressemblerait l'espace-temps sans contenu? Un habit sans forme ou pas d'habit du tout? Cette question très profonde a longuement préoccupé Einstein, et beaucoup d'autres.

L'espace-temps sans contenu? C'est le vide; et le terme est à peu près synonyme de celui d'éther. Doit-on distinguer « le vide » de « l'espace-temps ne contenant que du vide »? Avec quel statut ontologique? Devrait-on le baptiser « éther »? Ce sont des questions qui suscitent interrogations et débats aujourd'hui. Doit-on associer une densité d'énergie au vide? Pourrait-elle être négative?

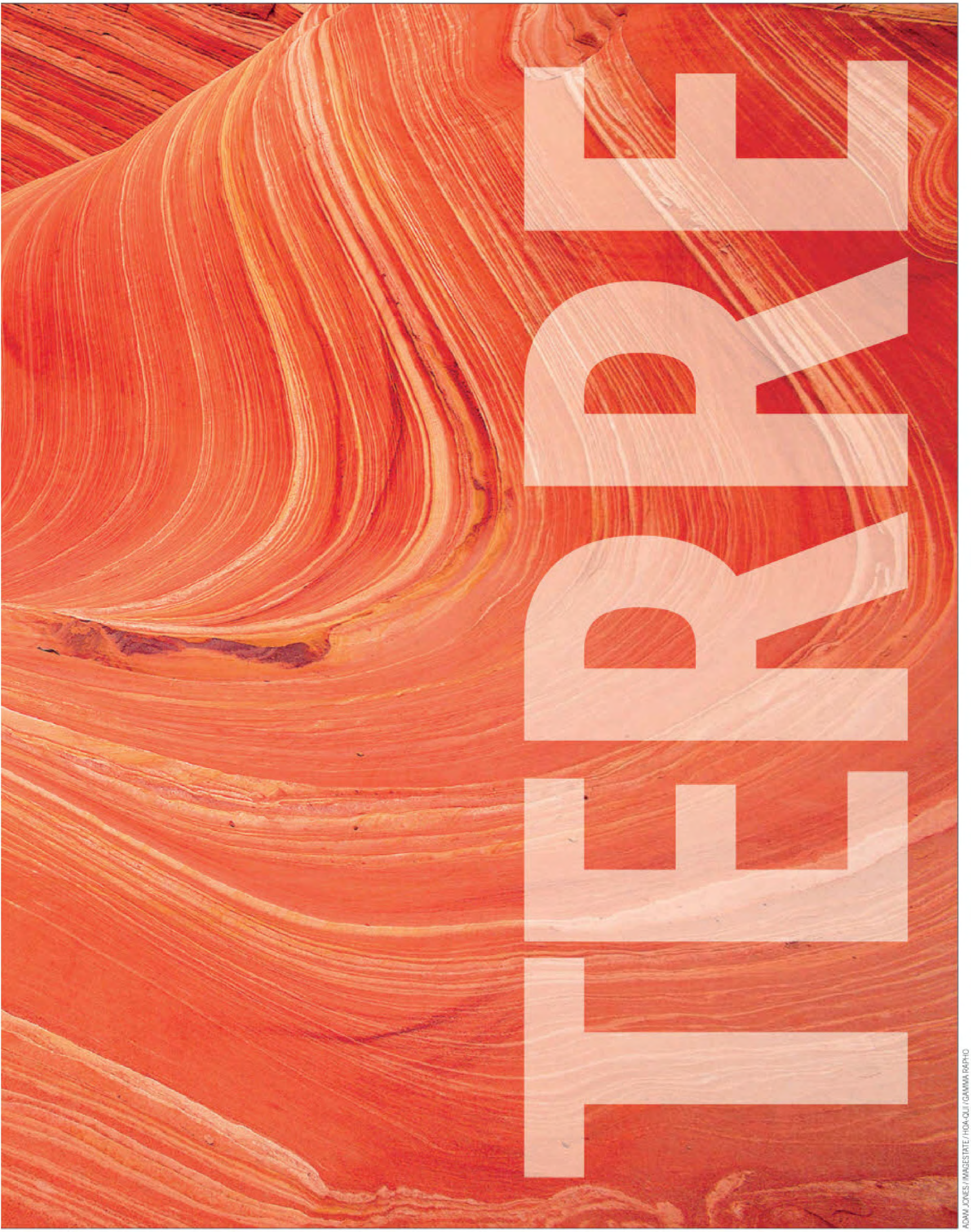
La relativité générale considère le vide comme une certaine forme minimale de la géométrie de l'espace-temps. Tandis que la physique quantique considère le « vide quantique » comme une entité fluctuante, presque matérielle, qui pourrait évoquer le clapotis de vagues à la surface de la mer. Le vide quantique, en tout cas, n'est pas rien. Nous ignorons malheureusement la manière dont il influence la structure de l'espace-temps. Par exemple, en l'absence de théorie qui en rende compte, certains supposent que – sous l'appellation d'énergie sombre – il pourrait constituer le moteur de l'accélération de l'expansion cosmique.

Le statut du vide cristallise en fait les oppositions entre les points de vue relativiste et quantique : ce problème dépasse le cadre de la cosmologie et contamine aujourd'hui toute la physique théorique. La question de l'éther serait-elle en train de nous indiquer une fois de plus que la physique est en crise elle aussi?

PROPOS RECUEILLIS PAR AZAR KHALATBARI

Ci-dessus : « L'homme s'extrayant de la représentation médiévale du monde », divisé en régions sublunaire et supralunaire où règne l'éther. Gravure de l'*Astronomie populaire* de Camille Flammarion, 1888.
Ci-contre : Les cinq éléments classés par le physicien et astrologue anglais Robert Fludd (1574-1637).

Des milliards de planètes aux allures de Terre seraient dispersées dans l'Univers. Mais ont-elles, comme la nôtre, un sol vivant, façonné en permanence par la coopération des micro-organismes, des roches et des végétaux ?



ADAM JONES / IMAGESTATE / HOA-QUI / GAMMA RAPHO

Lasers et presses à enclumes de diamants permettent d'étudier, en laboratoire, la structure minérale des grandes profondeurs terrestres.

Des diamants pour explorer le centre de la Terre

Reportage à l'Institut de minéralogie et de physique des milieux condensés (Paris)
CLARA DELPAS
Photos VO TRUNG DUNG/LOOK AT SCIENCES POUR SCIENCES ET AVENIR

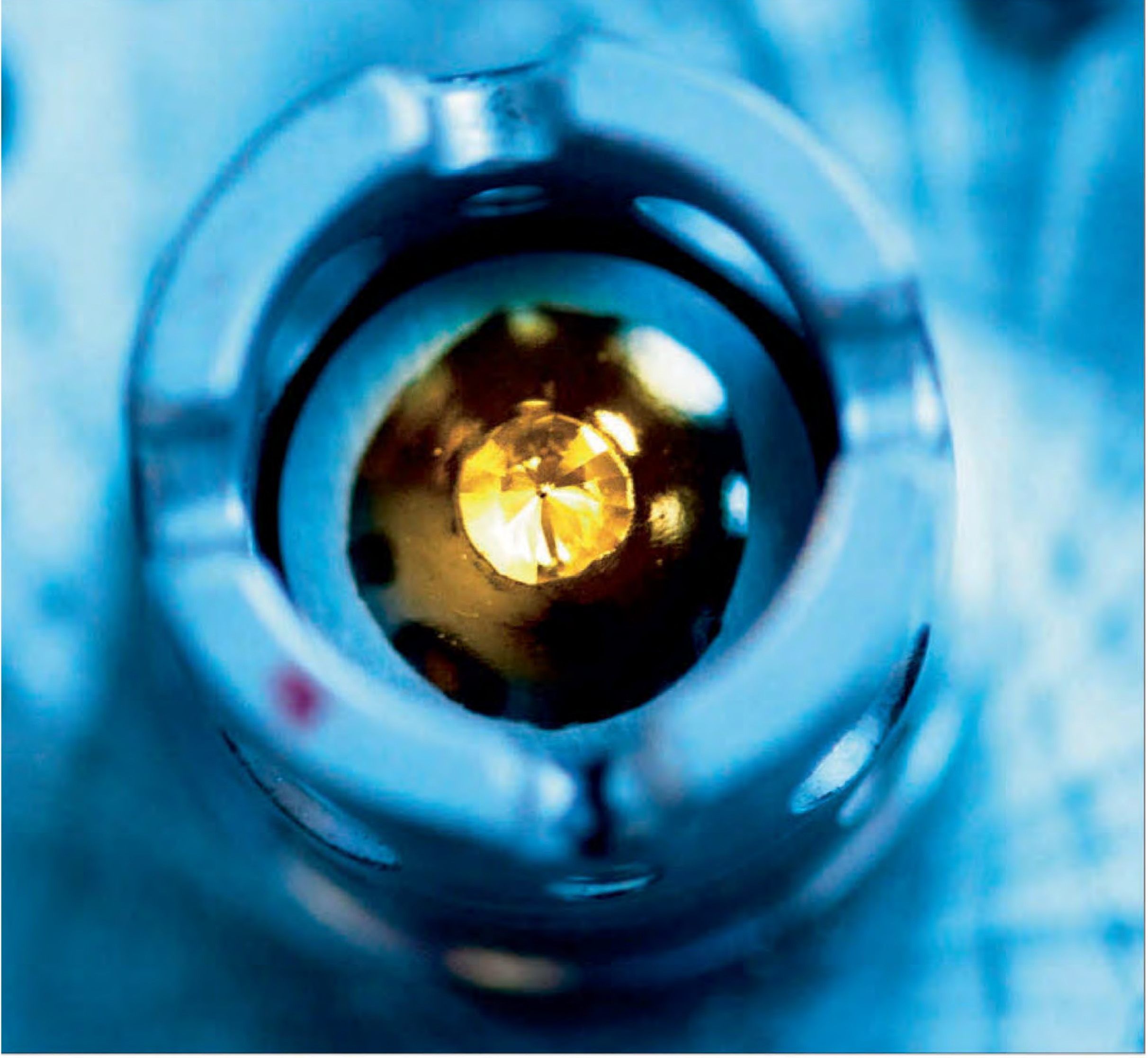
La porte s'ouvre sur une vaste salle équipée d'une belle collection d'instruments d'optique. Miroirs, microscopes, télescopes et écrans semblent disposés au petit bonheur, sur deux tables de plusieurs mètres de long. Mais ce n'est qu'une illusion : ici, tout est ajusté au micromètre près, le milieu devant être le plus stable possible. Avant chaque expérience, pour vérification, les tables s'illuminent de faisceaux colorés rouges et verts, signature des lasers qui circulent entre tous les éléments du dispositif alignés à la perfection. Lasers mis à part, dans cette salle d'expérimentation de l'Institut de minéralogie et de physique des milieux condensés, à Paris, le spectaculaire ne saute pas aux yeux. Quand soudain Guillaume Fiquet, le directeur adjoint du laboratoire, ouvre un tiroir et en sort… un sachet de diamants. D'authentiques « cailloux » sans le moindre défaut, spécialement taillés par des joailliers ! Il saisit un court cylindre métallique ouvert à une extrémité, y glisse un diamant, le pointe vers le haut. Puis il s'empare du piston adapté au cylindre et répète l'opération avec un second diamant. Il fait ensuite coulisser le piston dans le cylindre : les deux pointes se retrouvent face à face. « *Et voici le principe de la presse à enclumes de diamant*, explique le minéralogiste. *Plus vous comprimez fortement l'arrière du piston, par exemple avec du gaz, plus vous rapprochez les pointes, générant entre les deux une pression considérable.* » D'où l'intérêt du diamant, le plus dur des matériaux, le seul à supporter un tel traitement sans se déformer. En en plaçant un petit échantillon entre les deux pointes, on peut observer son état lorsqu'il est soumis à des pressions variables, pouvant aller jusqu'aux conditions à l'œuvre au centre de la Terre.

Une tour Eiffel sur le dos de la main

Le centre de la Terre… Il n'y a guère que les héros verniens du voyage éponyme qui aient réussi à s'en approcher. Les plus grosses machines de forage jamais conçues se sont, elles, révélées impuissantes à perforer la trentaine de kilomètres d'épaisseur de la croûte terrestre. Tout au plus y ont-elles taillé une égratignure de 12 262 mètres de profondeur exactement, le record absolu de forage, sous la presqu'île russe de Kola, à la fin des années 1980. Aussi, comment savoir quelle est la pression au centre de la Terre ?

D'une façon générale, tout ce que l'on sait de la structure et de la composition de notre planète découle de calculs et de la mise en relation de plusieurs disciplines comme l'astronomie, la physique, la mécanique des solides et des fluides, la géologie, la chimie minérale, la tectonique des plaques et la sismologie… Par exemple, la Terre « pèse » 6.10^{24} kg – une masse qui n'a évidemment pu être vérifiée par l'expérience. Les chercheurs ont procédé par déductions, grâce aux lois astronomiques qui relient masse et attraction des planètes et de

Le site de l'Ecole nationale supérieure de Lyon
http://planet-terre.ens-lyon.fr, mots clés : cellules à enclumes de diamant



leurs satellites, la Lune dans notre cas. Pour la pression, elle serait au cœur du globe plus de trois millions et demi de fois supérieure à la pression atmosphérique… Passer de la surface au centre de la Terre reviendrait à supporter tout de go *« le poids de la tour Eiffel à l'envers sur le dos de la main »*, illustre Guillaume Fiquet. Une pression qu'il est précisément possible d'atteindre grâce à la technologie utilisée dans ce laboratoire.

La presse est composée d'un cylindre et d'un piston contenant chacun un diamant, taillé de manière à présenter une minuscule surface plane. L'échantillon à tester sera placé entre les deux pierres.

Cook and look

L'expérience démarre. Tout le monde chausse des lunettes de protection, obligatoires pour ne pas perdre la vue : à l'intérieur de la presse à enclumes, dans la microchambre de confinement, l'échantillon – un minuscule morceau de fer – est mis sous pression avant d'être illuminé par un laser infrarouge invisible. Aucun risque pour les diamants. Parfaitement transparents, ils se laissent traverser sans carboniser. D'où l'exigence de pureté, qui n'est pas un caprice de chercheur ! La moindre petite inclusion – un simple fragment de matériau ayant cristallisé lors de la formation du diamant – suffirait, en chauffant, à tout faire exploser !

La suite ? Ici, *« on fait du "cook and look" : on cuisine, puis on regarde l'échantillon »*, résume le minéralogiste. Le mini-observatoire d'astronomie qui équipe la table d'expérience permet de mesurer la température du métal observé : la lumière qu'il émet est collectée par un habile jeu de miroirs de télescopes, version miniature ; son image apparaît aussitôt sur l'écran de contrôle d'une caméra. Une partie de la lumière est, elle, renvoyée à un spectromètre qui en détermine la température à partir de l'intensité lumineuse et de la longueur d'onde. *« Qui dit lumière dit chaleur ! On procède à la manière des mesures faites pour déterminer la température des étoiles ou de tout objet radiant »*, poursuit Guillaume Fiquet. L'échantillon livrera d'autres propriétés physiques en passant par différents cribles : spectromètre Raman (qui déterminera sa structure moléculaire), spectromètre Brillouin (qui mesure les vitesses du son dans les matériaux), voire synchro- ●●●

1

2

●●● tron de l'European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) à Grenoble, où Guillaume Fiquet se rend souvent pour étudier les propriétés élastiques ou la structure de ses échantillons.

« *Toutes ces expériences permettent d'en savoir plus sur la structure des minéraux, leur état, solide, liquide ou gazeux dans les différentes couches qui composent notre planète, leurs propriétés…*, détaille Guillaume Fiquet. *Car la presse à enclumes de diamant permet de modéliser ce qui se passe à différentes profondeurs de la Terre.* » Ainsi a-t-on pu mieux comprendre comment cristallisaient les roches du manteau, ou encore quel était l'état du fer aux abords du centre de la Terre – à plus de 6000 kilomètres de profondeur *(lire l'encadré ci-contre)*.

Derviche tourneur

Grâce à cette technologie, toute hypothèse émise sur la composition du noyau peut aussitôt être mise à l'épreuve. Voilà comment on a déterminé, dès les années 1950, que le noyau interne était une « graine » métallique solide contenant essentiellement du fer, tandis que le noyau externe, liquide, ressemble plutôt à une sorte d'océan métallique aux mouvements chaotiques. Des expériences qui ont par ailleurs confirmé que le fer y est probablement allié avec un autre métal comme le nickel, associé à des éléments plus légers comme le silicium, l'oxygène, le carbone ou le soufre. Ces alliages présumés passent eux aussi les tests de pression et de température : « *Les derniers travaux de plusieurs équipes dans le monde, dont la nôtre*, précise

L'effet d'une bombe

Pour étudier l'intérieur de la Terre, rien de tel que les séismes… ou les essais nucléaires. La vitesse de propagation des ondes sismiques générées par les tremblements de terre ou les bombes thermonucléaires souterraines peut en effet être mesurée avec des sismomètres : les ondes empruntent différentes trajectoires à l'intérieur de la Terre, et leur vitesse de propagation reflète la densité et les propriétés des matériaux traversés. Leur analyse a contribué à définir la structure du globe telle qu'on l'admet aujourd'hui. Elles permettent ainsi une descente virtuelle vers le centre de la planète : à partir de 30 kilomètres de profondeur, on est dans le manteau ; à 2900 kilomètres, dans le noyau externe (liquide) ; et à 5100 kilomètres, dans la « graine » – le noyau interne, solide. Et de déduire quels en sont les matériaux constitutifs : dans les années 1950, un géophysicien américain, Francis Birch, a montré que la propagation des ondes sismiques dans le fer était proche de celle que l'on pouvait observer au travers du noyau de la Terre. Il en a conclu que le fer était un élément majoritaire dans le noyau, ce que l'analyse des météorites laissait supposer depuis la fin du XIXe siècle. Selon un protocole analogue, il a aussi montré que le manteau terrestre était principalement composé de roches silicatées.

Les diamants ne sont pas éternels !

Le diamant est le plus dur des minéraux. Pour qui l'aurait oublié, la phrase mnémotechnique de l'échelle de dureté rappelle, non sans verve, que *« ta grosse concierge follement amoureuse ose quémander tes caresses divines »*. Le premier mot, *ta*, vaut pour le talc, le moins dur des minéraux. Le dernier, *divines*, pour le diamant. Le diamant raye tout et rien ne le déforme, au point que l'on ne peut le polir qu'avec… de la poussière de diamant. Mais qui dit dur ne veut pas dire indestructible. *« Le diamant peut casser. Il suffit de taper dessus avec un marteau selon un plan de faiblesse ! »*, rappelle Guillaume Fiquet. Dans l'enclume, un simple choc entre les deux pointes, par exemple, et c'est l'échec assuré. Pour limiter la casse, on dispose entre celles-ci une petite feuille percée d'un trou de quelques dixièmes de millimètre afin qu'elles ne se touchent plus : une mini-chambre de pression, en quelque sorte. Autre contrainte : la pression est une force rapportée à une surface. Faute de pouvoir augmenter indéfiniment la force, il faut donc… réduire la surface. *« Nous sommes obligés d'utiliser des diamants dont la pointe est d'une cinquantaine ou d'une centaine de micromètres, selon le domaine de pression que l'on veut atteindre »*, précise le chercheur. Au final, l'équipe de ce laboratoire consomme tout de même chaque année une petite vingtaine de joyaux à 1 000 ou 2 000 euros la pièce !

Guillaume Fiquet, *défendent la présence de silicium dans le noyau. »* Cependant, ces presses ne permettent pas d'accéder à toutes les réponses, et les scientifiques s'appuient aussi sur d'autres modèles pour étudier notamment la composition du noyau et du manteau *(lire* Sciences et Avenir *n° 718, décembre 2006). « Pendant longtemps*, poursuit le chercheur, *l'idée a prévalu qu'un seul type de constituant était à l'origine de notre planète, à savoir une météorite du type chondrite carbonée, la plus primitive du Système solaire. »* Depuis le nouveau modèle de formation du Système solaire développé en 2005 à l'observatoire de Nice par l'astronome italien Alessandro Morbidelli, les scientifiques envisagent l'hypothèse que d'autres types d'objets venus de l'espace aient pu former la Terre. Reste à savoir lesquels.

De même, ces presses ne permettent pas d'appréhender toutes les lois physiques qui régissent les milieux souterrains. Par exemple, *quid* du champ électromagnétique terrestre émis par les mouvements du fer ? Ces derniers doivent être modélisés par d'autres dispositifs expérimentaux, tel celui du Laboratoire de géophysique interne et de tectonophysique (LGIT) de Grenoble, qui a fabriqué une réplique miniature du noyau terrestre à partir d'une sphère métallique emplie d'un métal conducteur : du sodium liquide. Réplique qui, comme l'original, tourne sans cesse sur elle-même – d'où son nom de Derviche tourneur. Quant aux chercheurs américains Glatzmaier et Roberts, du Los Alamos National Laboratory (Nouveau-Mexique), ils ont procédé en 2002 à une modélisation numérique assimilant le noyau à une sorte de dynamo géante générant le champ magnétique terrestre.

❶ Le chercheur Guillaume Fiquet met en place la presse à enclumes de diamant.
❷ Il observe au microscope le résultat de l'expérience.
❸ La chambre de confinement où est placé l'échantillon, située au centre du joint qui sera comprimé entre les deux diamants.

Le noyau externe, une sorte d'océan métallique aux mouvements chaotiques

Mais au fait, au centre de la Terre… y a-t-il des diamants ? *« A moins de disposer d'un système où le carbone est très abondant, faire "pousser" du diamant dans du métal liquide est impossible*, rétorque aussitôt le minéralogiste. *Dans le noyau terrestre, au fer majoritaire, le carbone du diamant se dissoudrait aussitôt dans le métal sous forme de carbures de fer. »* Le fer adore le carbone, comme le prouve la facilité avec laquelle on peut les allier pour fabriquer de l'acier. *« Un diamant provient donc au maximum de 700 à 800 kilomètres de profondeur… c'est ce que nous disent quelques inclusions »*, conclut le chercheur.

Point de diamants au cœur, donc, mais plus probablement – selon des expériences menées sur le fer avec… des presses à enclumes de diamant – un ou des cristaux de fer géants, dont l'agencement précis reste à déterminer Une image qui relève peut-être de la « géopoésie », mais qui n'aurait sans doute pas déplu aux héros de Jules Verne ! ■

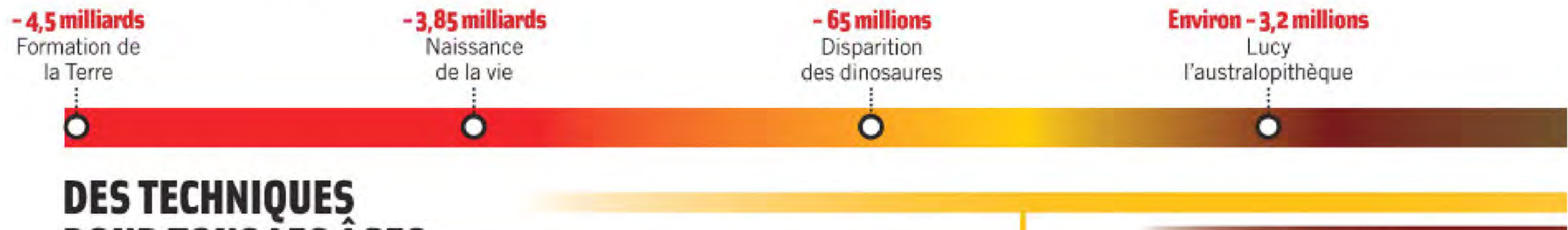
Pour dater ossements, laves ou tessons, les techniques s'affinent et se complètent. Mais la méthode infaillible n'existe toujours pas.

Pour une poignée de millénaires

Les pierres découvertes à la Pedra Furada (Brésil) ou à Longgupo (Chine) ont-elles été façonnées par l'homme ? Cette question, qui divise les spécialistes de la Terre et de son peuplement depuis des années, est aujourd'hui *« tranchée*, assure le lithicien Eric Boëda, professeur à l'université Paris X-Nanterre. *Il s'agit bien d'outils qui témoignent, pour les premiers, que l'Amérique a été peuplée il y a au moins 25 000 ans, et pour les seconds, que la Chine a connu ses premiers peuplements il y a 1,8 million d'années »*. Des dates impensables pour les tenants d'une archéologie classique, pour qui l'homme préhistorique n'est sorti d'Afrique que tardivement, il y a peut-être 200 000 ans, et n'a pu conquérir l'Asie qu'après cette date et les Amériques bien plus récemment encore.

Le chercheur français s'est fait une spécialité de la reprise de fouilles sur des sites controversés. Il ausculte les sols, établit des stratigraphies, analyse les pierres sous toutes leurs fractures… *« Je suis le seul à faire de la taphonomie (1) des pierres*, explique Eric Boëda. *Sur chaque site, je compare les cailloux "anthropiques" à ceux qui ont été brisés "naturellement", analysant statistiquement leurs différences, vérifiant que le nombre de surfaces planes (utiles) obtenues est supérieur à 50 % ou encore que des éclats ont été retouchés. A la Pedra Furada, on trouve des outils différents dans les couches de -19 000 ans et celles de -25 000 ans. S'ils s'étaient cassés naturellement, ils se ressembleraient… »* Pour les deux sites, le lithicien s'est appuyé sur des méthodes de datation relatives, car il a mis au jour une belle succession de couches sédimentaires. Mais aussi absolues *(voir la frise ci-dessous)* : carbone 14 et RSE pour la Pedra Furada, paléomagnétisme et uranium-thorium pour Longgupo. Des confirmations indispensables pour clore les polémiques autour de ces sites truffés de galets, de fossiles… mais non humains.

On sait depuis le XIXe siècle que les sédiments recèlent des assemblages de fossiles différents d'une couche à l'autre. D'où l'idée que des sites contemporains, même



DES TECHNIQUES POUR TOUS LES ÂGES

La datation absolue ou objective, basée sur des analyses physico-chimiques d'échantillons, fournit une date chiffrée, avec une précision plus ou moins grande selon les méthodes. Cette échelle non linéaire des temps géologiques et des grands événements terrestres permet de situer les champs temporels d'application des principales méthodes de datation employées aujourd'hui par les chercheurs.

éloignés, contiennent des fossiles similaires. C'est ainsi que l'étude des terrains géologiques a permis d'élaborer un calendrier de l'histoire de la Terre fondé sur la succession des strates et des fossiles : les terrains fossilifères ont été divisés en ères (primaire, secondaire, tertiaire et quaternaire), puis les ères en époques, les époques en périodes, les périodes en étages… Aujourd'hui, on date ainsi du mésozoïque (de - 250 millions d'années à - 65 millions d'années) tout site où l'on trouve des dinosaures!

Ce calendrier est évidemment relatif. La détermination de l'âge absolu des couches sédimentaires n'a été rendue possible que grâce à la technologie de l'âge nucléaire. Celle-ci fournit des méthodes de datation basées sur le fait que la croûte terrestre contient plusieurs composés chimiques pouvant exister sous des formes instables, ou isotopes, qui se désintègrent en émettant des particules atomiques. Ces formes instables dites « parentes » finissent par atteindre un état stable – ou forme « fille » – représentant un composé chimique différent. Le potassium 40 devient de l'argon 40; l'uranium 238 du plomb 206, le carbone 14 de l'azote 14, etc. Chaque isotope se désintègre à une vitesse différente, donnée par ce qu'on appelle la demi-vie (2). En mesurant les proportions relatives de forme parentale et de forme fille d'un échantillon, il est donc possible de déterminer la date à laquelle le processus de désintégration a commencé. Les datations portent sur des périodes d'autant plus étendues que la demi-vie de l'isotope est longue, avec une perte de précision pour les grands chiffres. La demi-vie de l'uranium est de 4,5 milliards d'années; celle du carbone 14 de 5 730 ans.

Cette dernière méthode est la plus couramment utilisée depuis les années 1960. Toutefois, elle permet uniquement de dater des échantillons récents et organiques. Elle nécessite en outre un effort incessant de calibration pour corriger les résultats en fonction de la variation de la teneur en ^{14}C de l'atmosphère durant la période étudiée, car celle-ci n'a cessé de varier en fonction du paléomagnétisme, du relargage de CO_2, etc.! Depuis l'étude de coraux (analysés par carbone 14 et isotopes uranium/thorium), les scientifiques savent qu'un âge carbone 14 de 17 000 ans correspond à un âge calendaire de 20 000 ans. Mais il subsiste d'autres écueils : *« Une contamination de 1 % en carbone moderne donne un âge de 33 000 ans pour un objet de 40 000 ans »*, résume Paul Mellars, archéologue de Cambridge (Royaume-Uni). Des spectromètres de masse comptent aujourd'hui directement les éléments isotopes de carbone, permettant d'affiner la technique. Et les méthodes d'ultrafiltration du carbone développées à l'Institut Max-Planck de Leipzig éliminent la matière organique moderne.

On le voit, la datation absolue n'est pas la panacée : ces techniques exigent le laboratoire, sont coûteuses et souvent destructrices pour l'échantillon. Et certains fossiles sont trop précieux pour être – même partiellement – détruits. Les chercheurs ont donc le devoir de s'interroger sur la façon dont ils sont parvenus jusqu'à nous. C'est le travail de la géologie et de la sédimentologie, qui reconstituent l'histoire d'un site parfois sur des millions d'années. *« Nous avons désormais de bons moyens d'investigation pour déterminer l'histoire de la Terre et de ses peuplements, et ainsi revisiter les sites les plus problématiques,* conclut Eric Boëda. *Ce qu'il faut faire tomber maintenant, ce sont les verrous mentaux, ceux qui nous empêchent d'imaginer des scénarios d'un déploiement très ancien de l'humanité à la surface du globe. »*

RACHEL MULOT

La datation absolue est souvent destructrice de l'échantillon

1. Etude des processus naturels et/ou artificiels de déformation, conservation ou de fossilisation des « objets » archéologiques (fossiles, structures géologiques, production matérielle).
2. Temps mis par un isotope pour perdre la moitié de son activité radioactive.

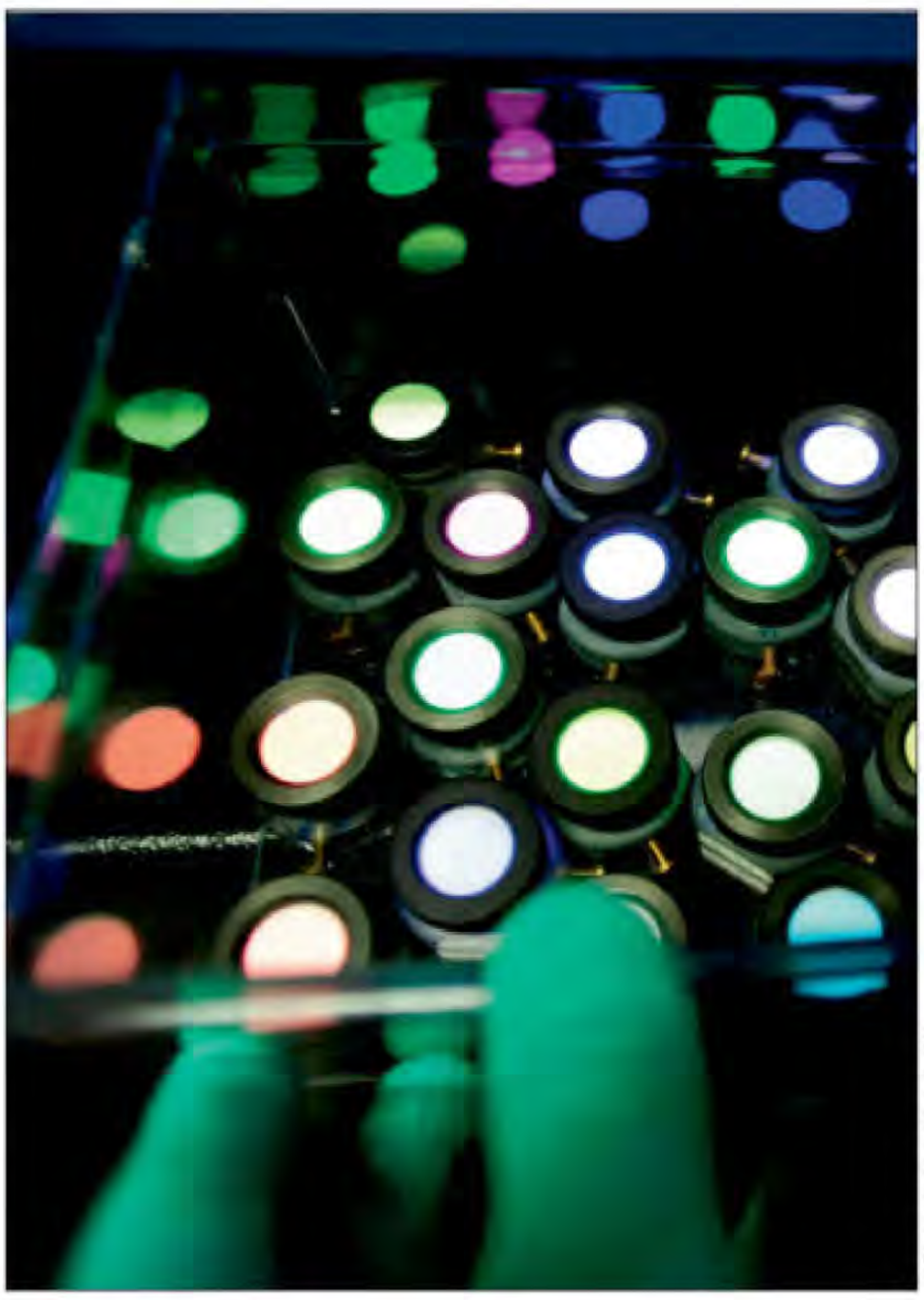
MEHDI BENMEZZAR POUR SCIENCES ET AVENIR HORS-SÉRIE

Métaux rares : une mine d'idées pour s'en passer

Pour s'affranchir de ces éléments indispensables aux produits high tech mais sur lesquels les Chinois ont la haute main, les Occidentaux développent des stratégies innovantes de récupération et de substitution.

Terres rares. L'expression est trompeuse. Car ces 14 éléments chimiques (1) qui se présentent sous forme métallique sont relativement abondants : la croûte terrestre renferme autant de certains d'entre eux que de cuivre ou de plomb. Ces éléments mal nommés sont devenus indispensables à d'innombrables applications technologiques. Sans eux, les écrans d'ordinateur consomment davantage, les aimants permanents sont moins puissants, les batteries moins efficaces… Des applications multiples qui ont créé une tension sur ces ressources naturelles. D'autant que la Chine détient un quasi-monopole sur leur exploitation, et qu'elle cherche maintenant à se réserver une grande partie de sa production en limitant les exportations. Résultat, le prix de ces éléments stratégiques se met à flamber.

Du coup, deux options s'offrent aux Occidentaux : augmenter la production – ils commencent à exploiter leurs propres gisements et à en chercher de nouveaux – ou réduire leur demande en substituant aux terres rares d'autres matériaux aux propriétés semblables. Pour quelques applications, les chimistes y parviennent partiellement. Malheureusement, les terres rares possèdent une couche électronique supplémentaire – baptisée 4*f* – qui leur confère des caractéristiques uniques : davantage de possibilités, selon le nombre d'électrons 4*f*, d'émettre de la lumière de différentes longueurs d'onde, par exemple fortement monochromatique pour les lasers; et des propriétés magnétiques conduisant à des aimantations à saturation bien plus grandes que celles du fer. Enfin, les terres rares jouent un rôle crucial dans le domaine de la catalyse. A titre d'exemple, l'oxyde de cérium est utilisé dans la régulation de la teneur en oxygène des gaz d'échappement, pour convertir le monoxyde de carbone en CO_2.



JÉRÔME CHATIN/EXPANSION-RÉA

Poudres de terres rares émettant de la lumière aux ultraviolets, utilisées pour les lampes basse consommation.

Dans certains cas, on peut tout de même essayer de remplacer une terre rare par une autre, moins utilisée. Par exemple, les aimants permanents les plus puissants, employés notamment dans les moteurs électriques ou les générateurs d'éoliennes, sont fabriqués avec un alliage de néodyme, de fer et de bore. Quand on sait qu'un rotor de grosse éolienne contient 600 kilogrammes d'aimants, on comprend aisément la tension que ce type d'application fait peser sur les ressources en néodyme. Or, les minerais contiennent généralement un mélange de terres rares, de sorte que lorsqu'on extrait du néodyme, il reste, entre autres, comme sous-produit, du gadolinium, également ferromagnétique et nettement moins demandé. Il serait tout à fait possible d'obtenir des aimants en remplaçant tout ou partie du néodyme par du gadolinium. Des recherches prometteuses en ce sens sont en cours.

Autre exemple : les batteries électriques de type nickel-hydrure métallique (Ni-MH), très gourmandes en terres rares. Pour un véhicule hybride équipé d'une grosse batterie, on arrive à un total de 12 à 15 kilogrammes de terres rares. L'alliage le plus répandu est le LaNi5. Pour s'affranchir du lanthane (La), l'équipe de Michel Latroche, directeur de l'Institut de chimie des matériaux de l'université Paris-Est, met au point des batteries où il est remplacé à 25 % par du magnésium. Peu coûteux, ce dernier abonde dans la croûte terrestre. Mieux : plus léger que le lanthane, il offre des capacités massiques supérieures. Il permet de gagner ainsi près de 30 % de capacité pour l'électrode négative, tout en en réduisant le coût.

Outre une utilisation plus parcimonieuse grâce au remplacement des terres rares par d'autres éléments, les industriels envisagent aussi la mise au point de mines hors sol, en fait de gigantesques usines de recyclage. Par exemple, la société belge Umicore fait fonctionner une unité qui récupère les vieux téléphones et les cartes mères d'ordinateur. En entrée de chaîne, les déchets électriques; à l'autre bout : des lingots d'or et d'autres métaux… dont les terres rares. De même, Rhodia a annoncé récemment sa volonté d'effectuer le recyclage des terres rares contenues dans les lampes à basse consommation usagées.

Une telle expérience devrait inciter les industriels à relever le défi de la récupération. Peut-être est-ce le prix à payer pour que nous continuions à profiter de toutes les applications de haute technologie que nous apportent ces éléments chimiques hors du commun.

PHILIPPE PAJOT

1. Du lanthane au lutétium (sauf le prométhium, qui est radioactif et non exploitable pour des applications industrielles).

Le télescope de 3,6 mètres de La Silla, au Chili, observant la Voie lactée.

Des planètes habitables par milliards ?

Deux exoplanètes pouvant receler de l'eau liquide, source de vie, ont été repérées dans la Galaxie. Preuve, selon les astrophysiciens, que la Voie lactée abrite une myriade de « Terres ».

C'est une nouvelle révolution dans le ciel de l'astrophysique. Les télescopes braqués sur le fin fond de la Galaxie révèlent l'existence d'exoplanètes telluriques – rocheuses comme la Terre – en quantité bien supérieure à ce que l'on pensait jusqu'alors. Depuis les observations, en 1995, de Michel Mayor et Didier Queloz (université de Genève), on en avait en effet repéré des centaines. D'abord de grosses sphères gazeuses, proches de leur étoile – ce qui leur valut le surnom de « jupiters chauds ». Puis, la sensibilité de détection s'améliorant, des planètes plus petites, ou avec des orbites plus larges. Mais on devait s'en tenir à des comptages individuels, difficiles à extrapoler à toute la Galaxie. Une étude publiée dans *Astronomy & Astrophysics* vient de changer la donne. A l'aide du spectroscope Harps placé au foyer du télescope de 3,6 mètres de l'European Organisation for Astronomical Research in the Southern Hemisphere, l'Eso, à La Silla (Chili), une équipe internationale a observé six ans durant un échantillon de 109 naines rouges. Autour de ces étoiles, moins lumineuses que le Soleil, les planètes sont plus faciles à isoler. L'échantillon a révélé neuf « superterres », planètes pesant de deux à dix fois la masse de la Terre, dont deux exoplanètes situées dans la zone habitable de leur étoile – à bonne distance pour que les conditions y permettent l'existence de l'eau liquide… Une extrapolation a permis de conclure que 40 % des naines rouges ont une superterre dans leur zone d'habitabilité. La Voie lactée en abritant 160 milliards, on atteint le chiffre vertigineux de dizaines de milliards de superterres « habitables » dans notre Galaxie ! Publiée en 2011, une autre étude portant sur 300 étoiles de type solaire vient confirmer cette inflation. 0,5 % des étoiles de la Galaxie ont des jupiters chauds, 10 %, des géantes gazeuses de type Jupiter ou Saturne, et… 50 %, des planètes telluriques. De quoi tenir en haleine les chasseurs d'exoterres, ces planètes analogues à la nôtre sur lesquelles de la vie pourrait exister. Plusieurs satellites dédiés à leur découverte sont en cours d'évaluation, et apporteront peut-être de nouvelles surprises aux alentours de 2020.

PHILIPPE PAJOT

http://ipag.osug.fr/science-pour-tous/faits-marquants/article/des-milliards-de-planetes

S. BRUNIER/ESO

INTERVIEW

« Le sol est si compact que les racines ne le traversent plus »

Des décennies d'agriculture intensive ont épuisé la terre. Selon **Emmanuel Bourguignon***, l'abandon progressif des techniques de labour profond peut leur rendre tout leur potentiel de vie.

LYDIA BOURGUIGNON/LAMS

Il y a une vingtaine d'années, quand ils ont quitté l'Inra pour créer le Lams, l'un des premiers laboratoires indépendants d'analyse des sols, vos parents, Claude et Lydia Bourguignon, disaient : *« La terre est à l'agonie. »* Qu'en est-il aujourd'hui ?

Heureusement, il est impossible que la terre soit vraiment morte, entièrement stérilisée, sans aucune activité biologique ! Mais l'état de santé de la population microbienne des sols européens est encore préoccupant aujourd'hui. D'après nos analyses, il semble pourtant que la situation se soit un peu améliorée depuis le milieu des années 2000, grâce à la prise de conscience des agriculteurs et aux nouvelles normes d'utilisation des produits phytosanitaires. Reste que, dans le système d'agriculture issu de la révolution verte, on a toujours recours à davantage d'engrais pour maintenir les rendements des années 1980. Les sols sont sous perfusion.

Plus précisément, quel est votre diagnostic ?

Dans les terres labourées depuis longtemps, il se forme ce qu'on appelle une semelle de labour, à 30 centimètres de profondeur environ, là où le fer de la charrue lisse le sol et le durcit. A cet endroit, la terre est compactée au point que les racines ne peuvent plus la traverser pour aller chercher de quoi se nourrir. Dans les échantillons que nous prélevons, nous constatons que les racines du blé font un angle droit au niveau de la semelle de labour, alors qu'il est normalement capable de plonger jusqu'à 2,5 mètres pour trouver de l'eau. Les années de sécheresse, cela fait toute la différence ! Une analyse limitée aux trente premiers centimètres va automatiquement faire préconiser le recours à davantage d'amendements. C'est pourquoi nous prélevons des échantillons à plus d'un mètre de profondeur – et à un mètre, il y a encore des terriers de lombrics – afin de connaître les éléments nutritifs de tout l'horizon exploré naturellement par les racines. Nous donnons à l'agriculteur une image exacte de la fertilité de son sol. Les nutriments vivant au-delà de 30 centimètres font passer de 80 à 50 unités le besoin de potasse à l'hectare… Ce n'est pas négligeable.

Les techniques respectueuses ne sont pas réservées aux doux rêveurs. De très gros exploitants s'y sont mis.

Quelles solutions préconisez-vous ?

L'objectif est d'abandonner les techniques de labour profond qui compactent les sols et d'adopter progressivement le semis direct sous couvert, en fendant la terre sans labour à travers le mulch constitué par une culture intercalaire (pois, vesces, moutarde…) adaptée à chaque sol. Ce qui évitera de laisser la terre à nu, tout en réduisant la présence des mauvaises herbes et en enrichissant le sol ou en fournissant du fourrage. Les agriculteurs passés au semis direct voient la biomasse de leur sol augmenter régulièrement.

Comment passer d'un système conventionnel au semis direct ?

Il faut une phase intermédiaire de techniques culturales simplifiées (TCS), au labour moins profond, avant d'arriver progressivement au semis direct sous couvert sans labour. Certes, les habitudes ont la vie dure et les institutions résistent, mais les mentalités évoluent. Depuis trois ou quatre ans, le durable et le bio ne sont plus considérés comme relevant du folklore. On voit qu'il est possible de concilier autonomie, productivité et produits de qualité tout en préservant l'environnement et la santé des agriculteurs. Les techniques respectueuses ne sont pas réservées à quelques doux rêveurs : de très gros exploitants s'y sont mis… Même si, en France, le semis direct concerne encore moins de 1 % de la surface agricole. De toute façon, l'effondrement des réserves pétrolières obligera à prendre des décisions, car l'agriculture d'aujourd'hui est très consommatrice d'énergies fossiles. Tous les éléments sont en place pour adopter une agriculture raisonnée. Si ma génération a la force de casser les lobbies de l'industrie agroalimentaire, qui exige des marges de rentabilité supérieures à 10 %, il y a de l'espoir !

PROPOS RECUEILLIS PAR PASCALE PISANI

* Microbiologiste, consultant au Lams, Laboratoire Analyses Microbiologiques Sols

BIOSPHOTO/JEAN-MICHEL LABAT

Plantes et lombrics collaborent étroitement pour fertiliser les sols.

Roches, plantes et vers, tous solidaires !

Animaux, micro-organismes, végétaux et minéraux, même combat! Ils interagissent en permanence pour faire des sols des écosystèmes vivants.

Jusqu'à un milliard de micro-organismes dans un gramme de terre ! Les scientifiques auront mis longtemps à le percevoir, mais le sol – ce ruban qui recouvre l'enveloppe terrestre sur une épaisseur d'un mètre – est une matière vivante qui naît, arrive à maturité et meurt. Une dynamique qui repose sur les liaisons secrètes qu'entretiennent minéraux et organismes vivants. Pour la comprendre, il faut donc mobiliser la biologie. « *L'entrée en force, dans les années 1970, de cette discipline dans la compréhension de mécanismes comme l'altération minérale, longtemps considérés comme purement physico-chimiques, a été déterminante* », explique Jean-François Ponge, spécialiste en écologie des sols et professeur au Museum national d'histoire naturelle.

Comment se développe un sol ? « *Par ses deux bouts* ! », répond Claude Bourguignon, fondateur du Laboratoire Analyses Microbiologiques Sols *(lire l'interview d'Emmanuel Bourguignon ci-contre)*. Et d'abord en profondeur. « *On sait depuis les années 1990 que les bactéries altèrent les minéraux*, reprend Jean-François Ponge, *mais ce n'est que récemment qu'on a découvert que les racines des végétaux sont capables d'extraire de la roche les éléments indispensables à leur nutrition : calcium, potasse, phosphore.* » Le travail de sape des bactéries est accéléré par la synergie qu'elles instaurent avec les végétaux : les sucres secrétés par les racines grâce à la photosynthèse leur fournissent de l'énergie. En retour, les bactéries libèrent les éléments utiles à la croissance des végétaux.

En surface, une autre scène se déroule. La litière, cette fine couche de résidus végétaux et animaux, est littéralement digérée par des micro-organismes – bactéries, algues, amibes et champignons – et une petite faune comptant notamment les acariens et les collemboles (0,5 à 1,5 mm). Ainsi fragmentée, la matière organique pénètre les sols par le haut. Thierry Desjardins, chercheur à l'Institut de recherche pour le développement (IRD), en explique le rôle primordial : « *Bien que présente en faible quantité , elle est la source d'énergie des organismes vivants. Et elle contribue de façon essentielle à la formation des sols.* » En s'unissant aux argiles, en effet, les molécules humiques issues de la dégradation de la matière organique précipitent et forment un complexe stable et stratifié, qui résiste à l'eau.

Toutefois, dans cette chimie bien vivante, nombre de détails échappent encore aux scientifiques. On estime par exemple que des centaines de milliers d'espèces de bactéries, champignons, plantes ou animaux restent à décrire. Et malgré sa proximité, le sol est difficile à observer. Pour y voir plus clair, les chercheurs disposent d'un nouvel outil : la spectrométrie infrarouge. Car le rayonnement infrarouge réfléchi par un échantillon de sol contient de l'information sur sa composition : « *teneur en carbone, azote, argile… mais aussi respiration du sol, biomasse microbienne, etc.* », énumère Bernard Barthès, agropédologue à l'IRD. La technique permet également de reconnaître l'empreinte organique laissée par certaines espèces. Un jeu de piste qui a conduit les scientifiques à découvrir l'étonnante collaboration des lombrics et des racines dans la formation des agrégats, ces petites billes de terre issues des rejets organiques qui aèrent le sol, hébergent des bactéries et sont impliquées dans la séquestration du carbone.

A l'instar des bananiers dont les gènes défensifs contre certaines bactéries s'activent en présence de vers de terre, comme viennent de le montrer des chercheurs de l'IRD (1), il se produit entre espèces d'un même sol de véritables échanges, ce qui, selon Jean-François Ponge, « *accrédite l'idée que les mécanismes évolutifs ne portent seulement pas sur les gènes ou une espèce, mais bien sur une communauté d'espèces, voire leur écosystème* ». L'étude des signaux chimiques transmis dans les interactions entre micro-organismes, plantes et animaux offre donc une perspective très prometteuse. Une connaissance décisive, puisqu'elle doit permettre de répondre à un enjeu capital : celui de la production alimentaire mondiale. **FRANÇOIS FOLLIET**

1. Sciences au Sud no 64, avril-mai 2012.

Claude et Lydia Bourguignon, *Le Sol, la Terre et les hommes*, Le Sang de la Terre, 2008

« L'inframonde, lieu où la mort se mue en vie »

Interview. Chez les Mayas et les Aztèques, les neuf mondes souterrains ne sont pas associés à la notion de châtiment, mais à celle de régénération. Ils sont le théâtre de la victoire des forces vitales sur celles de la destruction.

Dans les représentations cosmogoniques des grandes civilisations précolombiennes, et en particulier chez les Mayas, il est souvent question d'inframonde…

L'inframonde est en effet l'un des éléments les plus importants du cosmos pour les peuples mésoaméricains. Il fait partie d'un univers conçu comme une superposition de niveaux, représenté à la fois verticalement et en plan. Le monde est un carré divisé en quatre quartiers (chacun des quatre points cardinaux correspondant à un quart de l'Univers), au centre duquel passe un axe vertical qui relie entre eux trois plans horizontaux : l'inframonde, la Terre, et le monde supérieur. Le cosmogramme maya étant hautement structuré, parmi les vingt-deux niveaux qui composaient cet ensemble, neuf concernaient l'inframonde, où régnaient les neuf Seigneurs de la nuit.

CLAUDE-FRANÇOIS BAUDEZ
archéologue, spécialiste du monde maya, directeur de recherches honoraire au CNRS.

Peut-on comparer l'enfer judéo-chrétien à l'inframonde mésoaméricain?

Absolument pas. Contrairement aux religions monothéistes *(lire l'encadré p. 63)*, les cultures américaines n'associaient à ces lieux souterrains aucune notion de châtiment. De plus, l'au-delà ne dépendait pas de la qualité de la vie menée par un individu pendant son passage terrestre, mais uniquement de la façon dont il était mort.

Pouvez-vous préciser?

La question est assez délicate à traiter concernant la civilisation maya, car nous ne disposons que de très peu d'éléments. Par contre, on en sait un peu plus du côté des Aztèques. D'une façon générale, au sein de ce groupe que l'on appelle également Mexicas, les défunts étaient ordinairement incinérés. Toutefois, en fonction de la façon dont la mort était advenue, ils rejoignaient différents au-delà. Le plus prestigieux était réservé à deux catégories de la population : les guerriers, morts sur les champs de bataille ou sur les autels sacrificiels, et les femmes décédées en couches. Ces deux groupes détenaient en effet le privilège d'accompagner le soleil dans sa course. Les premiers l'escortaient de son lever jusqu'à midi ; tandis que les secondes le suivaient de midi jusqu'au couchant. Cette conception établissait l'égalité des hommes-guerriers et des femmes-mères. Un deuxième au-delà était quant à lui destiné à tous ceux dont la mort était liée à l'eau, que ce soit par hydropisie ou par noyade. Ces individus n'étaient pas incinérés, mais inhumés pour rejoindre le paradis de Tlaloc, le dieu de l'Eau. Un troisième cas s'adressait au commun des mortels. Avec une perspective relativement pessimiste, par ailleurs. Dans cet au-delà, l'âme du défunt devait affronter quantité d'épreuves, comme de passer à proximité de montagnes d'obsidiennes, lesquelles cherchaient de nouveau à la « tuer ». On sait ●●●

L'ENFER EST PAVÉ DE MICRO-ORGANISMES

Sur Terre, l'enfer existe aussi… du moins pour de minuscules créatures sans noyau, possédant un tout petit génome et longtemps confondues avec les bactéries : les archées.

« Elles correspondent à l'une des trois grandes lignées évolutives des cellules modernes, aux côtés des bactéries et des eucaryotes (organismes dont les cellules ont des noyaux – animaux, champignons, plantes…) », explique le microbiologiste Patrick Forterre (université d'Orsay et institut Pasteur). Pendant longtemps, les chercheurs se sont surtout intéressés aux archées vivant dans les sources hydrothermales des grandes profondeurs océaniques ou les sources chaudes du parc de Yellowstone (Etats-Unis). Elles y prospèrent jusqu'à des températures de 110 degrés, réussite sans doute liée à leurs membranes imperméables qui leur permet de conserver l'énergie intracellulaire dans des conditions de vie difficile.

Depuis une dizaine d'années, les archées sont retrouvées partout, dans les océans comme dans les sols. Ces six dernières années, il est apparu que ces archées « froides » jouent un rôle majeur dans les cycles de l'azote et du carbone. *« De quoi revoir les modèles d'évolution des climats ou de la composition de l'atmosphère impliquant des micro-organismes »*, souligne Patrick Forterre.

SLUB DRESDEN / IMSOR. DRESD.R.310

Page du Codex de Dresde, manuscrit maya du XIVe siècle. Parmi les divinités de cet almanach divinatoire, le Seigneur de la mort régnant sur l'inframonde.

L'Enfer de Dante est pour les artistes une source d'inspiration intarissable. Ici, vu par le peintre autrichien Joseph Anton Koch en 1825-1829. Rome, Casino Massimo.

●●● seulement que cette âme finissait par se dissoudre et qu'elle disparaissait dans l'inframonde à la fin de son voyage.

Chez les peuples mésoaméricains, deux éléments fondamentaux semblent s'opposer en permanence…

Il faut savoir que la conception maya de l'inframonde, comme toute la pensée mésoaméricaine, est profondément dualiste. Une opposition binaire que l'on retrouve partout, en permanence. Cette bipolarité essentielle s'articule autour d'une opposition entre un aspect sec et un aspect humide. Entre un inframonde humide, domaine de l'eau, fertile, féminin, et un monde souterrain sec, domaine du feu, stérile et masculin.

De quelle façon était représenté l'aspect humide de l'inframonde ?

Il prenait, dans les bâtiments religieux, la forme de masques figurant la terre et les eaux souterraines, source de vie. Dans l'inframonde, les animaux faisant référence à cet aspect humide sont essentiellement des amphibiens, des crocodiles ou des tortues. La végétation est quant à elle symbolisée par des nénuphars, la plante aquatique par excellence, son plus important emblème. Toutefois, chez les Mayas comme dans l'ensemble des cultures mésoaméricaines, si chacun savait bien que la pluie et les eaux souterraines contribuaient à la croissance des plantes, personne n'ignorait que si tout sortait de terre, tout y retournait aussi…

L'inframonde humide semble avoir été le plus important…

Absolument. Les Mayas ont été confrontés en permanence à de graves problèmes d'eau. Par exemple, la zone centrale de l'aire maya, occupée par la forêt, possédait un faible réseau hydrographique. Pour pouvoir obtenir de l'eau, les habitants devaient creuser d'immenses bassins dans l'argile afin de recueillir l'eau de pluie. Par contre, dans la région du Yucatán, un grand plateau calcaire où les rivières étaient totalement absentes, on ne pouvait obtenir de l'eau qu'en forant de profonds puits ou en creusant des citernes (*chultuns)* qu'alimentaient les eaux de ruissellement. Les Mayas exploitaient aussi les cénotes, c'est-à-dire les puits naturels résultant de l'effondrement de la couche karstique de surface, qui laisse à découvert la nappe phréatique. Il est par ailleurs intéressant de savoir, concernant l'eau, que les populations de ces contrées ne voyaient pas de discontinuité entre l'eau de mer et l'eau douce souterraine. Elles avaient constaté la présence d'eaux saumâtres dans certaines régions, là où l'eau de mer rentrait sous terre jusqu'à 20 kilomètres du littoral. Elles avaient également observé en mer l'existence de résurgences d'eau douce. Aussi, pour elles, eau douce et eau de mer possédaient une même origine. Elles pensaient en effet que l'eau de mer, en pénétrant dans les terres, était progressivement filtrée jusqu'à devenir douce.

Et concernant l'aspect sec ?

Il est celui de l'univers aride et stérile du séjour des morts et des puissances infernales, le Xibalba. Enterrés, les corps des défunts se décomposent sous la surface du sol avant de disparaître. Dans la cosmologie maya, cet aspect sec de l'inframonde est figuré par le jaguar nocturne, le félin associé aux cavernes et à la nuit. L'infra-

> “ L'inframonde sec est la demeure du soleil nocturne, représenté sous les traits du jaguar. Celui qui préside à la guerre et aux sacrifices sanglants.

AKG IMAGES/PRIZZI

LE CALCUL INFERNAL DE GALILÉE

L'Enfer est l'un des trois chants de *La Divine Comédie* de Dante (1265-1321), l'une des plus importantes œuvres littéraires universelles.
Y est dépeint l'endroit « creusé » dans sa chute par Lucifer, l'ange précipité sur terre par Dieu pour cause de rébellion. Une sorte d'entonnoir composé de neuf cercles, dont le sommet est au centre de la Terre, et dans lequel glissent à jamais *« et par ordre de vices »* les âmes des damnés.
Plus on descend dans ses entrailles, plus les supplices sont grands. L'ultime étape étant d'être broyé par les trois bouches du Démon.
Mais à quoi ressemble cet « au-dessous » dont la crainte fut une des grandes terreurs du Moyen Age ? A la Renaissance, il est demandé à Galilée (1564-1642) de répondre à cette question. L'ambitieux jeune homme, âgé de vingt-quatre ans, va mobiliser ses connaissances en mathématiques et physique pour déterminer la forme et les mesures exactes de l'enfer. Dans l'affrontement que se livrent sur le sujet plusieurs savants de l'époque, il apporte sa pierre à l'édifice fondé par le Florentin Antonio Manetti (1423-1497), et étaie avec virtuosité sa conception de la topographie du gouffre infernal. A la fin de l'année 1587, il prononce à l'Académie florentine *Deux leçons sur la forme, le site et la grandeur de* L'Enfer *de Dante*. Pour ce faire, *« il a étudié les indications spatiales dont Dante a émaillé son poème sacré »*, explique Lucette Degryse, spécialiste de Galilée.
Il énonce notamment que l'embouchure de l'enfer est couverte par une voûte de terre épaisse de 405,68 milles (1), au sommet de laquelle se trouve Jérusalem ; que le marais du Styx, comme le cimetière des hérétiques, est large de 37,5 milles ; ou encore qu'un ravin de 730,22 milles sépare le 6e cercle du 7e, qui abrite un lac de sang…

1. Le mille florentin équivaut à 1 890 mètres.

monde sec est en effet la demeure du soleil nocturne. Celui qui préside à la guerre et aux sacrifices sanglants. C'est ce monde que le soleil – sous les traits du jaguar – traverse d'ouest en est pendant la nuit. Moribond au moment de son coucher, l'astre reprend des forces grâce à l'afflux du sang des sacrifiés dont il se nourrit. Ainsi renaît-il régénéré chaque matin.

Le monde souterrain sec est donc un domaine inquiétant ?

Si l'on fait la guerre, si l'on fait des sacrifices, si l'on se sacrifie soi-même, c'est essentiellement pour communiquer de l'énergie au cosmos afin qu'il continue à fonctionner. Ainsi, à la fin de chaque cycle de 52 ans, les Aztèques sont terrorisés à l'idée que le soleil cesse de se lever. Ils allument alors le Feu nouveau pour célébrer le cycle qui commence et la continuité de la marche du soleil. En fait, l'inframonde sec est une sorte de laboratoire où l'on transforme la mort en vie. C'est un creuset de transmutation. C'est dans l'inframonde que, selon le mythe, le roi Waxaklajuun Ub'aah K'awiil (Dix-Huit Lapins) de Copán, l'antique cité du Honduras, affronte les Seigneurs des Enfers au jeu de balle pour en triompher et, par là, amener la victoire des forces vitales sur celles de la mort et de la destruction.

Représenter un souverain sortant de terre est donc une métaphore solaire ?

Absolument, comme l'indique par exemple la frise en stuc du site de Balamku, au Campeche. Sur la façade de ce temple du Ve siècle de notre ère, on remarque un roi émergeant de la gueule béante d'un animal terrestre : crapaud ou crocodile. Représenter un monarque sortant de terre était une allusion claire à son accession au trône, en même temps qu'une référence à la métaphore solaire. Identifié à l'astre, le roi accédait à son trône de la même façon que le soleil, à son lever, sort de terre et de la ligne d'horizon. A l'inverse, quand le roi mourait, il était représenté s'enfonçant en terre. Né de la terre, il y retournait à sa mort.

Chez les peuples mésoaméricains, le ciel semble avoir eu beaucoup moins d'importance que la terre…

On a fait valoir que dans les sociétés de pasteurs, la cosmologie donnait au ciel une part plus importante qu'à la terre. C'est le contraire qui se produit chez les peuples d'agriculteurs. Pour les populations agricoles qu'étaient les Mésoaméricains, le monde de dessous a toujours été plus important que celui de dessus…

PROPOS RECUEILLIS PAR BERNADETTE ARNAUD

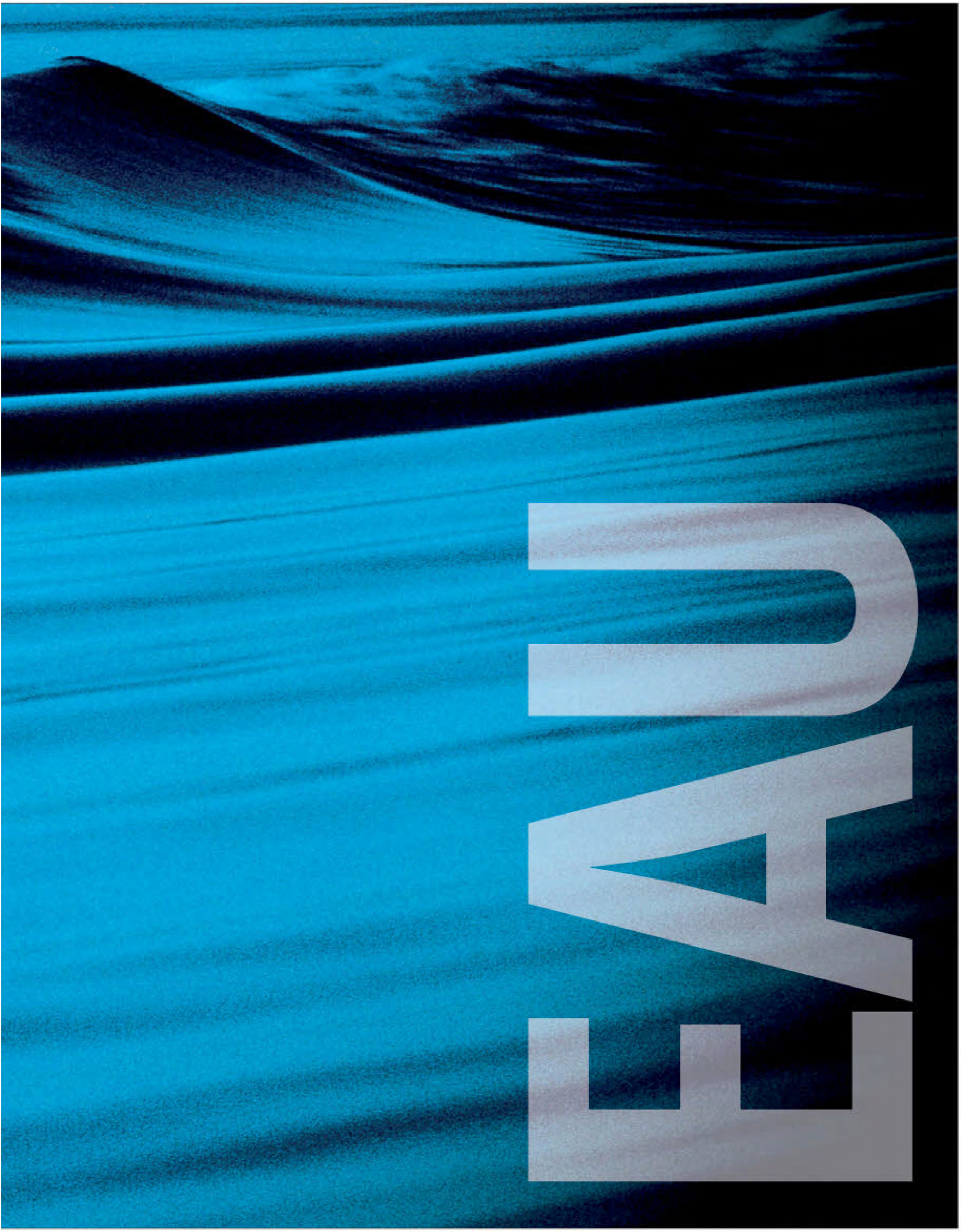
Claude-François Baudez, *Les Mayas*, Les Belles Lettres, 2004

Claude-François Baudez, *Une histoire de la religion des Mayas*, Albin Michel, 2002

Patrick Forterre, *Microbes de l'enfer*, Belin, 2007

Lucette Degryse, *Galilée. Leçons sur* L'Enfer *de Dante*, Fayard, 2008

Le comportement fantasque
de cette molécule pourtant
familière ne cesse
de dérouter les scientifiques.
Des réponses viendront
peut-être des galaxies
lointaines, où l'on repère
désormais sa trace.



GIORGIO LOTTI / IMAGESTATE / HOA-QUI / GAMMA RAPHO

En 2010, les radiotélescopes de Bure repéraient de la vapeur autour d'une étoile. Depuis, chaque observation le confirme : l'Univers regorge d'eau !

Le lointain écho des sources célestes

Reportage au plateau de Bure SYLVIE ROUAT
Photos VO TRUNG DUNG/LOOK AT SCIENCES POUR SCIENCES ET AVENIR

Une mer de nuages masque les vallées alentour. Soudain, après une dernière grimpée dans les gros cailloux secs du massif du Dévoluy (Hautes-Alpes), se dévoile devant nous le plateau de Bure et ses six paraboles tournées vers le ciel. Tout autour, les pics se découpent dans un ciel transparent. A environ deux heures de Grenoble, Bure est un petit royaume de la radioastronomie perché à 2550 mètres d'altitude. Seuls le vent et le doux ronronnement des moteurs qui gouvernent les mouvements lents des antennes viennent troubler cette solitude rocheuse. C'est ici, dans ce lieu quasi lunaire, qu'a été réalisée l'une des toutes premières détections d'eau dans l'Univers profond depuis la Terre.

Car c'est maintenant une certitude : il y a de l'eau partout dans le Cosmos. Et sous toutes ses formes. Certes, en dehors de la Terre, l'eau liquide n'aurait été repérée que dans le Système solaire, notamment sur Europe et Ganymède, satellites de Jupiter, ainsi que sur Titan et Encelade, lunes de Saturne. Mais de la glace et de la vapeur d'eau ont pu être signalées jusque dans les plus lointaines galaxies, et même au cœur des étoiles naissantes. C'est ainsi qu'il y a deux ans, à Bure, une équipe européenne a pu localiser de grandes quantités d'eau dans un système planétaire en formation autour de la toute jeune étoile NGC1333 IRAS4B, *« un endroit où l'on pensait qu'elle ne pouvait exister que sous forme de glace, indétectable par nos instruments »*, précise Roberto Neri, astronome à l'Iram (Institut de radioastronomie millimétrique) de Grenoble. La seule eau visible en radioastronomie est en effet la molécule de vapeur, qui rayonne dans le domaine millimétrique. Cette fois, le poupon-étoile avait tellement chauffé son environnement qu'il avait transformé la glace en vapeur.

Le bruit de l'eau dans l'atmosphère

Pour les radioastronomes, débusquer de l'eau extraterrestre nécessite ruses et gymnastique astronomiques. Leur premier handicap, c'est l'eau elle-même *(lire l'encadré p. 69)* ! La nôtre, celle qui compose en grande partie notre atmosphère sous forme de vapeur et génère du « bruit », de la même manière que la lumière des villes perturbe les télescopes. Comment distinguer en effet la trace d'une ●●●

Le site de l'Iram : http://iram-institute.org/

Trois des six paraboles de l'Institut de radioastronomie millimétrique (Iram) au plateau de Bure, dans les Hautes-Alpes. D'ici 2014, de nouveaux instruments permettront des observations quatre fois plus précises.

●●● molécule d'eau terrestre de celle venue d'un monde lointain de milliards de kilomètres ? Le second handicap vient du fait que la radioastronomie millimétrique n'a accès au Cosmos « aquatique » que par quatre minces fenêtres du spectre radio. En dehors de ces créneaux, c'est la nuit noire… car l'atmosphère absorbe toute radiation millimétrique, et donc les éventuels signaux de molécules d'eau.
Dans cette quête délicate, les astronomes peuvent s'appuyer, à Bure, sur un équipement de pointe. Car bien que conçues dans les années 1980, les antennes, d'un diamètre de 15 mètres chacune, n'en sont pas moins des instruments d'avant-garde. Elles ont d'ailleurs servi de modèle à celles d'Alma, le grand radiotélescope en construction au Chili *(lire l'encadré ci-dessous)*. Leur structure en fibre de carbone est recouverte d'une fine couche d'aluminium *« qui a une réflexivité quasi parfaite aux ondes radio »*, souligne Roberto Neri.

1

2

3

A 10 microns près

Au-dessus des montagnes, le ciel prend maintenant des couleurs crépusculaires. Le technicien Bruno Convers et l'opératrice Sophie Leonardon se dirigent vers l'une des paraboles, outils en main. La qualité des observations dépend de la perfection de la forme de ces instruments, des monstres de 130 tonnes dont la précision doit être inférieure à 50 microns pour le « miroir » principal et 10 microns pour le second ! Or l'une des antennes présente un défaut de forme. Bruno Convers se glisse avec dextérité entre les croisillons de carbone. Quelques « tours d'écrou » plus tard, la perfection est restaurée. Chacune des antennes est composée de 176 panneaux manœuvrés chacun par cinq moteurs. Soit une mécanique pilotée à quelques microns près dans des conditions extrêmes, puisque le plateau de Bure subit parfois des vents de plus de 200 km/h et des givres de -25 °C. Chaque parabole peut coulisser le long d'un rail selon une configuration définie pour chaque observation. *« Lorsqu'on les manipule*, explique Sophie Leonardon, *il faut mesurer leur emplacement avec une précision de 1/10e de millimètre, ainsi que les distances qui les séparent, pour connaître le décalage temporel existant entre elles et les sources du ciel. »*
Dans le bâtiment principal palpite le cœur du mécanisme : le corrélateur, une série d'appareils reliés entre eux qui mesurent la ressemblance entre les signaux observés par chaque couple d'antennes. *« C'est le taux de ressemblance qui permet de reconstituer l'image finale »*, explique Roberto Neri. Les six antennes sont pointées vers la même source dans l'espace, mais comme elles ne sont pas disposées au même endroit, le signal ne leur parvient pas au même moment. Le corrélateur doit donc tenir compte de l'infime délai existant entre leurs mesures. *« C'est comme s'il y avait plusieurs observateurs autour d'un lac*, imagine Roberto Neri. *Lorsqu'on jette une pierre dans ce lac, les ondes produites arrivent à des moments différents sur*

Alma et Noema, deux regards ultrasensibles

L'astronomie millimétrique permet de détecter les constituants fondamentaux des objets spatiaux, comme les gaz moléculaires et atomiques, la poussière et depuis peu… l'eau. En la matière, *« l'observatoire de Bure était, jusqu'au début de 2012, l'instrument le plus sensible au monde »*, souligne Roberto Neri. Depuis peu, le radiotélescope interférométrique Alma (Atacama Large Millimeter Array), en cours de construction à 5 100 mètres d'altitude au Chili, a pris la première place. Il disposera, en 2013, de 66 antennes. *« Mais Alma et Bure ont accès à des régions du ciel différentes*, précise Roberto Neri. *Ils sont complémentaires. »*
L'observatoire de Bure va tenter de garder la corde, toutefois, via le projet Noema (Northern Extended Millimeter Array). Il s'agit d'implanter six nouvelles paraboles de 15 mètres de diamètre (celles d'Alma font 12 et 7 mètres), de doubler la voie de déplacement des antennes et d'installer une nouvelle génération de récepteurs. L'ensemble permettra un gain de facteur 4 en finesse des détails et en sensibilité, pour étudier des objets plus faibles ou plus lointains dans un volume de l'Univers huit fois plus grand ! La construction, au budget de 46 millions d'euros, devrait débuter cette année, la mise en service de la première antenne étant prévue au printemps 2014.

Il y a eau… et eau !

Lorsque les astronomes ont pointé une source extraterrestre, ils doivent s'assurer que les molécules détectées ne parviennent pas d'un nuage remonté de la vallée ! Pour ce faire, ils vérifient l'identité de l'eau : para ou ortho ?
Car il y a l'eau parallèle et l'eau orthogonale. Les moments magnétiques des constituants de l'eau font que certains nucléons tournent dans un sens pour la première et dans l'autre pour la seconde. *« Or, sur Terre, il y a trois fois plus de molécules d'eau sous forme ortho*, indique Roberto Neri. *Donc, lorsqu'on détecte de grandes quantités d'eau para, cela indique qu'elle a vraisemblablement une origine extraterrestre. »*

les rives. En calculant la direction de ces ondes, on peut cependant en déduire l'endroit où a coulé le caillou. » Chaque source céleste est observée pendant cinq à dix heures. *« Le vent, la neige, la pluie, nuisent à la précision de l'instrument*, rappelle Sophie Leonardon. *Le bon fonctionnement de l'ensemble nécessite un équilibre entre les facteurs extérieurs et des matériaux délicats. Un miracle quotidien ! »* Les données sont ensuite stockées et acheminées directement à Grenoble, où elles font le miel des astronomes. Longtemps, ceux-ci ont pisté la trace de molécules d'eau. En vain. Ils ne cherchaient pas le bon signal ! En effet, *« pour que le rayonnement émis par la vapeur d'une source extraterrestre ne tombe pas au bord, mais en plein dans l'une des fameuses fenêtres d'accès, il est important qu'il soit décalé vers le rouge (observé à fréquence plus basse) ou vers le bleu (observé à fréquence plus haute) »*, explique Roberto Neri. Cela vise donc notamment les objets basés dans l'Univers lointain, dont les émissions sont décalées vers le rouge, comme par effet Doppler. L'ennui, c'est que *« plus l'objet est éloigné*, note Roberto Neri, *plus le signal est affaibli en arrivant sur Terre. Pour voir de l'eau dans des galaxies lointaines, il faut donc qu'il y en ait des quantités phénoménales. »*

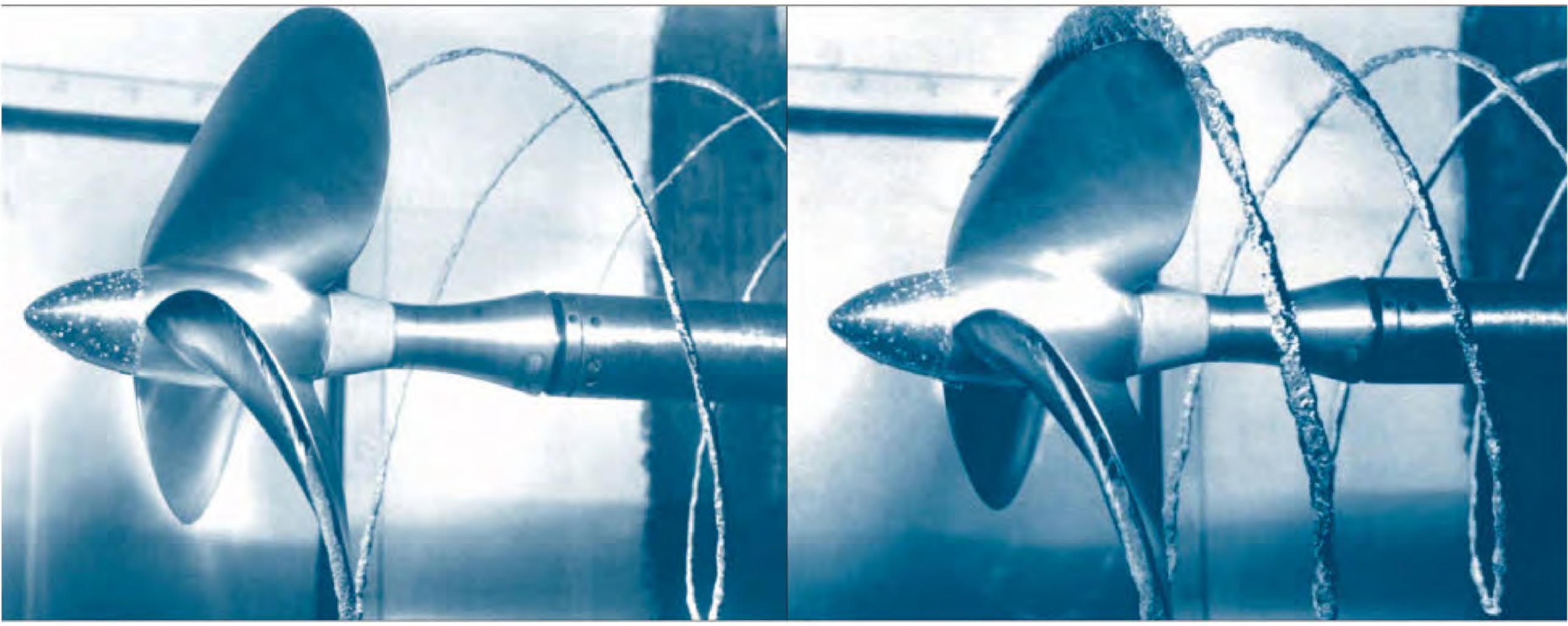
❶ **Les appareils doivent être réglés au micron près. Ici, un technicien ajuste les panneaux de réception d'une antenne.**

❷ **Dans la salle de pilotage, les écrans permettent de contrôler la position des 6 paraboles et de leurs 176 panneaux.**

❸ **Les antennes bénéficient chaque année d'une révision complète sous hangar.**

Jusqu'au bord des trous noirs

Comble de malchance, cette « ruse » ne fonctionne pas pour les systèmes proches. Mais il en faut plus pour désarmer les astronomes… Si la molécule d'eau la plus abondante est en effet celle qui est formée de l'isotope 16 de l'oxygène, il en existe une autre forme, avec un isotope 18, cinq cents fois plus rare sur Terre. Surtout, sa signature spectrale tombe pile dans l'une des fenêtres d'observation. C'est cette « forme » d'eau qui a précisément été repérée dans le disque de NGC1333 IRAS4B il y a deux ans.
Une date-clef. A partir de là, la détection d'eau dans l'Univers s'est considérablement accélérée. *« On en a déjà trouvé dans une dizaine de galaxies*, remarque Roberto Neri. *L'une d'entre elles est à une distance correspondant à un Univers âgé de seulement 870 millions d'années. Ce qui veut dire que la molécule d'eau était déjà présente en quantités considérables peu de temps après le Big Bang ! »* Si l'on sait désormais qu'il y a de la glace presque partout dans le Système solaire, ce que l'on trouve dans les galaxies lointaines *« dépasse d'un facteur 100 à 1 000 tout ce qu'il y a dans notre Galaxie »*. On en a même détecté autour de trous noirs ! A environ 1,5 million de kilomètres de la Terre, le télescope européen Herschel traque également, depuis 2009, l'eau cosmique. Et sa moisson est quasi miraculeuse. Lors d'un colloque à Grenoble en mars 2012, les scientifiques ont ainsi pointé l'omniprésence de l'eau dans les zones de formation d'étoiles, notamment dans les disques de matière qui les entourent et formeront ensuite des planètes et des lunes. Mieux, Herschel a découvert de grandes quantités d'eau au sein de jeunes systèmes planétaires, lorsque les pluies de comètes peuvent commencer à former des océans. Conséquence : puisque l'eau autorise la mise en place d'une chimie organique qui compose les briques essentielles de la vie, *« cela montre que le pas à faire pour fabriquer de la vie est sans doute très petit*, s'enthousiasme Roberto Neri. *Cela signifie peut-être que la vie s'est répétée dans d'innombrables galaxies. »* ■



Malgré son apparente limpidité, l'eau adopte, notamment en conditions extrêmes, des comportements insolites. Un casse-tête pour les chercheurs.

A froid, elle se met dans de drôles d'états…

Le plus familier des liquides est-il aussi le plus étrange ? Les nombreux comportements inhabituels de la molécule H_2O, près d'une centaine, pourraient le laisser penser. Un exemple notable : le maximum de densité de l'eau liquide ne coïncide pas avec sa température de solidification, mais se situe autour de 4 °C. Du coup, l'eau solide est moins dense que l'eau liquide – de sorte que les glaçons flottent… Certes, l'eau n'est pas seule à présenter des anomalies : le germanium solide, notamment, flotte sur le germanium liquide. Mais elle les accumule !

Nombre de ses propriétés anormales sont liées à l'existence d'un pont entre les molécules : la liaison hydrogène, due à la polarisation électrique entre l'atome d'oxygène et les deux atomes d'hydrogène qui lui sont liés. Du coup, il peut se créer un pont entre l'oxygène d'une molécule et l'hydrogène d'une deuxième. Pour l'eau liquide, ces liaisons ne sont pas rigides ; elles se font et se défont en permanence, au gré du mouvement des molécules. Bien qu'elles soient fugaces – de l'ordre d'une picoseconde (10^{-12} seconde) –, ce sont bien elles qui donnent sa structure à l'eau liquide. Chaque molécule peut compter quatre liaisons hydrogène. Quand elles sont toutes formées, les molécules s'« agrègent » temporairement en tétraèdres. Or, l'un des arrangements de ces « agrégats » tétraédriques les moins compacts est l'hexagone : précisément la structure cristalline usuelle de la glace. Cette configuration hexagonale crée des « trous » dans la glace… qui est, du coup, moins dense que le liquide.

Des gouttes liquides à - 60 ° C

Si l'eau liquide stable est globalement bien comprise, il est un domaine en pleine exploration : celui de la surfusion. De quoi s'agit-il ? Comme tout liquide, l'eau peut être portée à une température inférieure à sa température de solidification (0 °C dans ce cas) sans changer d'état. Faites l'expérience vous-même : mettez une bouteille d'eau distillée au congélateur. Le lendemain, l'eau sera encore liquide ! Mais perturbez la bouteille par un choc ou en ajoutant du sable, et son contenu gèlera quasi instantanément. L'eau surfondue est donc encore plus anormale que l'eau standard… Par exemple, à

AKG/SPL

l'inverse de tous les autres liquides, elle continue à se dilater lorsqu'on la refroidit.

Pour percer tous les mystères de cette eau dite « métastable », on s'acharne à la mesurer. Ce qui n'est pas une mince affaire, puisque la moindre perturbation entraîne sa cristallisation. Mais à force de persévérance, sa densité a toutefois pu être relevée jusqu'à – 34 °C. Quant au record de température, il vient d'être battu : des chercheurs allemands et américains ont réussi à obtenir des gouttelettes restées liquides quelques cents millièmes de seconde jusqu'à – 60 °C.

Reste que, dans ces conditions extrêmes, il est impossible d'effectuer des mesures thermodynamiques. Mais l'on sait depuis longtemps qu'il se passe alors des choses bizarres. Ainsi, dans les années 1970, les Américains R. J. Speedy et C. A. Angell, alors à l'université Purdue, dans l'Indiana, avaient remarqué que l'extrapolation des données expérimentales donnait à penser qu'il existait une température critique, vers – 45 °C, à laquelle les quantités thermodynamiques (comme le coefficient de dilatation isobare ou la compressibilité isotherme) tendaient vers l'infini.

Encore aujourd'hui, deux interprétations de ce casse-tête s'affrontent. Selon la première théorie, il existerait à basse température une transition de phase – de type liquide-vapeur – entre deux liquides de structures légèrement différentes. Comme s'il pouvait y avoir deux sortes d'eau. Comment caractériser ces structures ? Pour en savoir plus, notamment sur les différences de configuration des « agrégats » tétraédriques dus à la fameuse liaison hydrogène, il faut s'approcher de cette zone de transition en faisant varier certains paramètres. Ainsi, à basse pression, on observe une sorte de maillage hexagonal, tandis qu'à haute pression, les agrégats ont tendance à s'empiler. La structure de l'eau varierait donc non seulement en fonction de la température, mais aussi de la pression. A la transition entre les liquides, il y aurait un point critique qui induirait à son voisinage une forte variation des grandeurs physiques.

A mesure que l'on augmente la vitesse de rotation d'une hélice placée dans un tunnel d'eau (de gauche à droite), cette eau subit une pression de plus en plus négative, et « s'étire ». Mais au-delà d'un certain seuil, il y a rupture, et des bulles se forment.

La méthode de Berthelot

Même si la divergence des grandeurs thermodynamiques que l'on voit se dessiner expérimentalement s'explique bien par l'existence de ce second point critique, certains physiciens estiment qu'il faut plutôt en chercher l'origine du côté des pressions négatives, notion un peu inhabituelle. La pression, c'est la force que l'on applique à une surface : on comprend bien qu'on en exerce une en appuyant sur un liquide. Mais si, au lieu d'appuyer, on tire, le liquide devient soumis à une pression négative. C'est l'expérience réalisée en 1850 par le chimiste français Marcellin Berthelot : il a placé de l'eau dans un tube scellé à 28 °C, puis a refroidi progressivement le tube à 18 °C. La contrainte alors exercée sur l'eau revenait à la « tirer » à une pression de – 50 bars. Mais peut-on tirer indéfiniment ? Non, car il existe une limite de rupture à partir de laquelle des bulles de gaz apparaissent dans le liquide. C'est cette limite théorique – baptisée spinodale par les physiciens – qui, dans ce scénario, serait responsable de la divergence des grandeurs thermodynamiques.

Comment trancher ? *« En faisant des mesures précises dans l'eau surfondue, aussi près que possible de la spinodale et du point critique supposés »*, répond Frédéric Caupin, de l'université Claude-Bernard à Lyon. C'est le sens du projet européen lancé en 2010 qui vise à établir l'équation d'état de l'eau dans ces conditions extrêmes. Pour cela, il faut… revenir à la méthode de Berthelot, mais dans une petite boîte de quartz de quelques micromètres de côté. Car ces inclusions d'eau existent à l'état naturel dans les minéraux. Elles avaient même inspiré l'équipe de C. Angell pour descendre sous les – 1000 bars en 1991.

PHILIPPE PAJOT

Il existerait à basse température une transition de phase, comme s'il y avait deux sortes d'eau

Presque unanimement décriés lorsqu'ils ont été publiés il y a vingt-cinq ans, les travaux de Jacques Benveniste seront-ils réhabilités?

CATHERINE POLIEDRAS/LOOK AT SCIENCES

A-t-on retrouvé la mémoire de l'eau ?

Le chercheur Jacques Benveniste avait été mis au ban de la communauté scientifique pour ses théories iconoclastes. Stupeur : le prix Nobel Luc Montagnier s'appuie aujourd'hui sur ses travaux.

Le 30 juin 1988, la revue *Nature* publiait un article qui trouvait aussitôt un écho retentissant dans la presse mondiale : l'eau aurait… une mémoire. La preuve ? Une solution extrêmement diluée d'anticorps fait encore réagir les globules blancs humains sur lesquels elle est testée, alors même que lesdits anticorps y sont devenus « physiquement » indétectables.

Diluez une substance quelconque dans 9 fois son volume d'eau. Mélangez. Diluez ensuite un volume de ce mélange dans 9 volumes d'eau. Répétez l'opération jusqu'à la 120e dilution : il n'y aura plus, à ce stade, aucune molécule de substance détectable. Et pourtant, l'article établit que la solution obtenue agit encore sur l'immunité des cellules ! Emoi de la communauté scientifique. Début juillet 1988, une commission d'enquête est constituée. Le rédacteur en chef de la prestigieuse revue, John Maddox, épaulé de Walter Stewart, expert en fraude scientifique, et de James Randi, un illusionniste américain connu pour avoir démasqué la supercherie d'Uri Geller – l'homme qui tordait les petites cuillères à distance –, se rendent chez l'auteur principal de l'article, Jacques Benveniste, directeur de recherches à l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm) et mondialement respecté pour ses découvertes dans le domaine de l'asthme et de l'allergie. Ils lui font refaire les expériences… Et les résultats obtenus ne sont pas « fiables », n'étant reproduits que dans trois séries d'expériences sur quatre. Le rapport qui paraît à la fin du mois dans *Nature* titre *« La désillusion des expériences de hautes dilutions »*, jetant le discrédit sur l'hypothèse d'une mémoire de l'eau.

La suite de l'histoire ressemble à une chasse aux sorcières, avec le médecin français dans le rôle de l'hérétique. *« Les choses ont mal*

tourné », résume Wei Hsueh, professeur de pathologie à la Northwestern University de Chicago. Cette chercheuse, qui participa par la suite aux recherches de Benveniste, s'étonne encore : *« Je ne comprends toujours pas comment la communauté scientifique française et le monde entier ont pu faire ainsi la sourde oreille. Les expériences suivantes ont confirmé les premiers résultats publiés par* Nature. » En 1993, en effet, Jacques Benveniste mène de nouvelles expériences sur un dispositif d'expérimentation en cardiologie, l'appareil de Langendorff. Il perfuse des cœurs de cobaye avec des solutions hautement diluées d'histamine. Les variations du débit coronaire montrent un effet physiologique des hautes dilutions, alors que, comme attendu, l'eau pure reste sans effet. Ces résultats ont été constatés par le Laboratoire national de la santé (LNS), sollicité pour expertise à la demande du ministère, début 1994, après que le chercheur a lui-même communiqué ses résultats à Bernard Kouchner, alors ministre. Un constat timide, cependant, qui n'a pas suffi à empêcher l'Inserm de supprimer définitivement le laboratoire du chercheur en 1995. Et de le remercier.

Comment de si hautes dilutions pourraient-elles être encore biologiquement actives – si toutefois elles le sont ? Tout le monde s'accorde à dire que la réponse ne peut être chimique : après 120 dilutions, il n'y a évidemment plus aucune trace de molécules depuis longtemps ! En revanche, on sait que les atomes qui composent les molécules « vibrent » constamment, émettant un rayonnement infrarouge. Elles « battent » ainsi au rythme de fréquences très spécifiques, situées dans la gamme audible (20 à 20 000 hertz). D'où l'idée de Benveniste de les détecter et de les enregistrer sur la carte-son d'un ordinateur. Pour ce faire, il place un tube à essai contenant la solution hautement diluée de la substance active dans une bobine de cuivre générant un champ magnétique basse fréquence proche de celui relevé sur la Terre (résonance Schumann) ; bobine connectée à un amplificateur lui-même relié à un ordinateur. Le fichier, enregistré au format WAV, peut ensuite être lu dans un dispositif similaire et « transmis » à un échantillon d'eau pure, ce qui permet de doter l'eau des propriétés physiques et thérapeutiques de la substance active ainsi codée… sans la moindre molécule ! La technique aurait fonctionné avec un neurotransmetteur (l'acétylcholine), un anti-coagulant (l'héparine), ainsi qu'avec l'aspirine. Ces expériences ont donné lieu à plusieurs dépôts auprès de l'Office américain des brevets. Elles ont même suscité l'intérêt de l'Agence pour les projets de recherche avancée du département de la défense (Darpa) de l'armée américaine. Mais celle-ci, avec le même dispositif, n'est jamais parvenue à les reproduire.

Des expériences que l'armée américaine n'est jamais parvenue à reproduire

La théorie est pourtant loin d'être tombée aux oubliettes. Le professeur Luc Montagnier, prix Nobel de médecine 2008, dispose depuis début 2011, à l'université de Shanghai, d'un institut qui porte son nom, financé par le gouvernement chinois. En février 2012, le brevet qu'il a déposé auprès de l'Office américain (enregistré sous le numéro US2012/0024701) fait largement référence aux travaux de Jacques Benveniste, décédé en 2004 des suites d'une opération du cœur. Il porte sur une méthode permettant la détection de micro-organismes pathogènes à partir des ondes électromagnétiques basse fréquence qu'ils émettent dans des dilutions d'eau. Une méthode qui – puisqu'il n'est plus besoin d'isoler la molécule, mais juste son signal – pourrait déboucher sur de nouveaux tests de diagnostics d'affections bactériennes ou virales chroniques chez les patients infectés. Et continue de faire rêver à l'ère ultime des médicaments numériques, téléchargeables sur l'Apple Store !

CLARA DELPAS

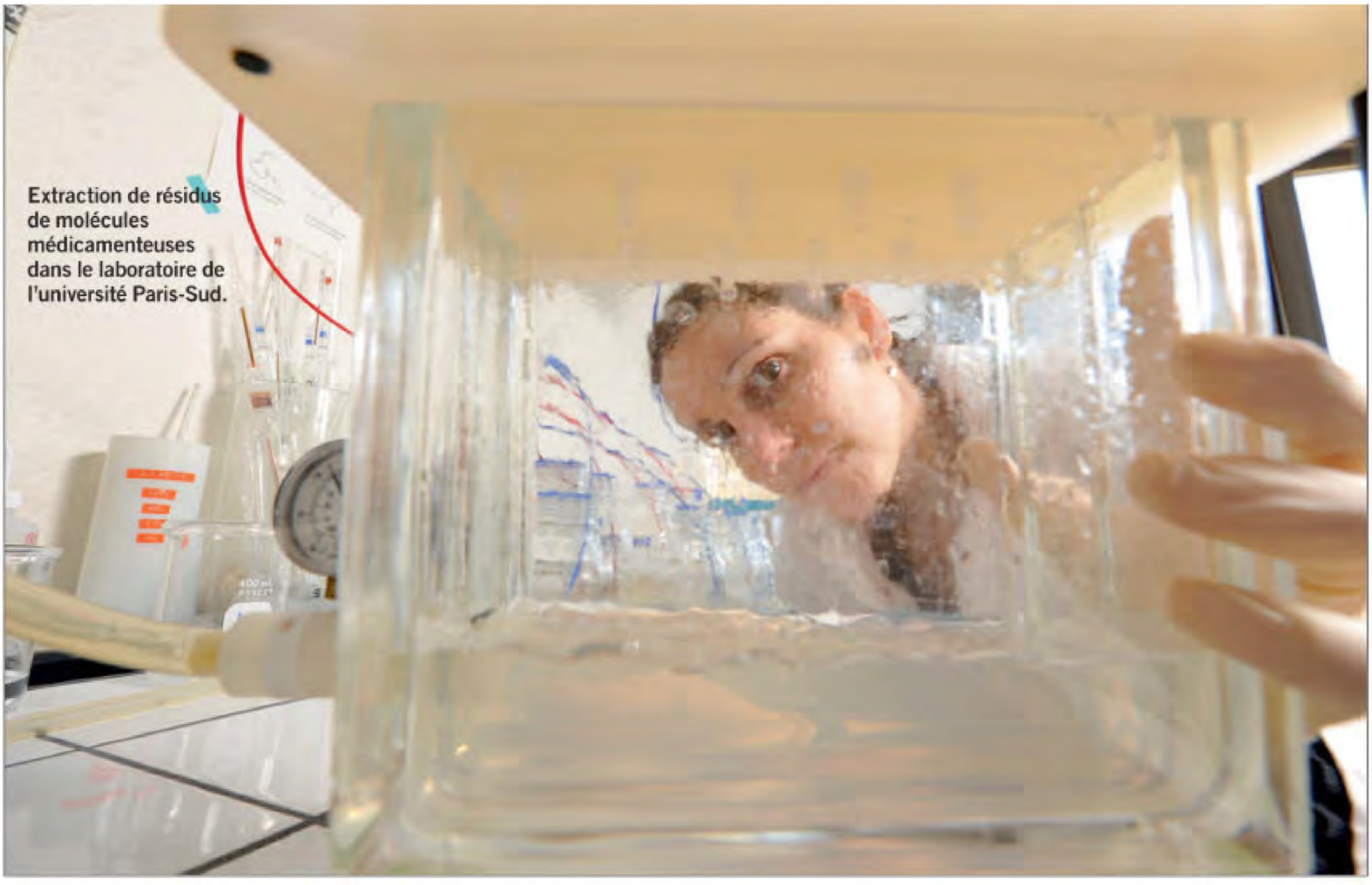
Emoto, le charmeur de cristaux

POLÉMIQUE. Pour améliorer le goût de votre eau, faites-lui écouter du Mozart plutôt que du heavy metal ! Ou mieux : écrivez « Amour et gratitude » sur une étiquette, ou simplement « Merci », et enroulez le papier autour de la bouteille. Peu importe la langue, l'eau est polyglotte. C'est ce que suggèrent les travaux du Japonais Masaru Emoto, docteur de l'Open International University for Alternative Medicines, un institut d'enseignement privé situé à Mumbai (Inde). Depuis trente ans, dans son laboratoire-institut de Tokyo, il observe la cristallisation de l'eau – le moment précis où elle passe de l'état d'eau liquide à celui de glace. Les photographies qu'il réalise semblent parler d'elles-mêmes : bercés de mots doux ou d'harmonies musicales, les cristaux se révèlent magnifiques. A l'inverse, l'eau insultée ne donne que des compositions disgracieuses.

La cristallisation de l'eau repose sur un système hexagonal, à l'instar des cristaux de neige formés dans les nuages et dont on connaît bien la forme : un cristal de Koch, étoile à six branches ramifiées à l'infini. Mais la forme de l'ensemble varie toujours du fait des conditions externes (température, humidité relative…). L'influence de l'intention ? Un essai en double aveugle permettrait d'avoir une approche plus scientifique du phénomène : il suffirait de comparer à une eau témoin de l'eau cristallisée avec une « intention », sans que l'observateur sache rien de ce qu'il observe. Mais Masaru Emoto s'est toujours refusé à une telle mise à l'épreuve. Aussi, ses travaux ne peuvent guère être appréciés autrement que d'un point de vue artistique ! **C. D.**

MASARU EMOTO OFFICE

L'artiste Masaru Emoto prétend que la pensée influe sur la cristallisation de l'eau. Ici, de l'eau de la source Saijo.



Extraction de résidus de molécules médicamenteuses dans le laboratoire de l'université Paris-Sud.

PATRICK ALLARD/REA

Micropolluants : à boire et à manger

Résidus pharmaceutiques, pesticides, métaux lourds… des millions de molécules indésirables passent chaque jour dans les eaux usées puis traitées, composant des cocktails qui inquiètent les spécialistes.

Des poissons qu'il est interdit de pêcher, d'autres qui changent de sexe ou éprouvent des difficultés à se reproduire, des algues qui prolifèrent… Ces phénomènes inquiétants résultent directement de l'état des eaux brutes, celles qui coulent sous terre ou dans les rivières. Leur qualité souffre des pesticides de l'agriculture, des métaux lourds de l'industrie, des solvants de la chimie, des résidus médicamenteux… S'il faut se méfier de l'eau qui dort, il convient plus que jamais de faire attention à celle qui court, aussi claire soit-elle.

« *De toute évidence, la planète est contaminée d'une manière colossale*, affirme le professeur Yves Lévi, spécialiste de ces questions au laboratoire de Santé publique - Environnement de l'université Paris-Sud. *Il a fallu l'épisode de Minamata au Japon pour que l'on réalise que l'on ne pouvait déverser n'importe quoi n'importe où : dans les années 1950 et 1960, les eaux littorales y ont été contaminées par des rejets de mercure, provoquant des décès dus à la consommation de poisson. Après ce scandale, l'utilisation des métaux lourds a diminué.* »

Mais, depuis, la palette des polluants s'est élargie. « *Le monde n'a jamais connu autant de molécules différentes* », poursuit Yves Lévi. De fait, des millions de molécules sont relâchées chaque jour dans la nature. Inoffensives pour la plupart, elles finissent toutes par arriver dans ce réceptacle final : l'eau. « *Aujourd'hui*, reprend le chercheur, *la vraie question est : quel est le risque environnemental et sanitaire lié à ces mélanges de molécules ? On ne peut plus étudier uniquement les dangers du plomb, mais ceux du plomb plus les perturbateurs endocriniens, du plomb plus les retardateurs de flamme, du plomb plus les médicaments, etc.* »

L'exemple des résidus médicamenteux, qui ne représentent qu'une infime partie des rejets de substances dans la nature, illustre cette complexité. Plus de 3300 molécules thérapeutiques ont été identifiées. Impossible de les rechercher toutes ! On les retrouve dans les eaux usées par le biais des urines, des effluents hospitaliers ou des effluents agricoles pour les médicaments vétérinaires. Comme aucune réglementation portant sur les critères de qualité des eaux n'exige de contrôle sur ces résidus, les peurs et rumeurs prospèrent. L'Anses, l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, a étudié la présence de 45 produits pharmaceutiques dans les eaux brutes et les eaux traitées. Elle a publié en 2011 ses premiers résultats : outre la caféine, les molécules les plus fréquemment détectées sont la carbamazépine, un antiépileptique, et

Dans les échantillons d'eau étudiés : caféine, anti-épileptiques, anxiolytiques…

l'oxazépam, un anxiolytique. Selon le rapport, plutôt rassurant, les concentrations restent néanmoins très faibles.

Mais si l'on ne peut encore étudier tous les micropolluants, les effets nocifs de certains d'entre eux sont connus depuis longtemps : dioxines, bisphénol A et autres PCB restent dans l'environnement plusieurs décennies et agissent sur l'équilibre des espèces vivantes. Ces perturbateurs endocriniens provoquent des dérèglements hormonaux sur la faune aquatique. On a ainsi noté une baisse de la production de spermatozoïdes chez les poissons… Prohibés en France depuis plus de vingt ans, les PCB n'ont toujours pas disparu ; ils se concentrent dans le gras des espèces aquacoles. En 2008, la consommation de certains poissons comme l'omble chevalier du lac du Bourget a d'ailleurs été temporairement interdite. Et il est toujours recommandé de limiter la consommation d'espèces comme les anguilles, les barbeaux, les brèmes… Toutefois, les niveaux d'imprégnation dans la population française ont diminué depuis les années 1980.

Que faire pour connaître mieux les effets de ces cocktails de molécules ? « *Le problème des micropolluants est international. Or, chaque pays bricole un peu dans son coin*, regrette Yves Lévi. *On crie au loup à longueur de congrès internationaux, mais il ne se passe rien. Il faudrait par exemple un grand institut d'écotoxicité en Europe. Mais le risque n'est pas considéré comme un enjeu international majeur. Les périls sont diffus et les contre-lobbies puissants.* » Encore vaut-il mieux être en France qu'en Inde ou au Zimbabwe, où la situation est autrement plus catastrophique.

Dans l'absolu, on sait aujourd'hui produire de l'eau potable à partir du lisier. Une prouesse technologique très coûteuse, qui ne répond que de manière incomplète à l'impérieuse question posée par l'organisation de protection de la nature WWF dans son rapport « Eau de boisson » publié en 2011 : « *Jusqu'à quel point pourra-t-on potabiliser de l'eau brute de plus en plus polluée ?* »

SYLVIE BRIET

DES PLUIES MOINS ACIDES

PRÉCIPITATIONS. Fraîche et limpide, l'eau qui tombe du ciel nous paraît naturellement bonne à boire. Mais l'affaire n'est pas si simple. Ainsi, en France, pour la Direction générale de la santé, le verdict est clair : l'eau de pluie « *présente une contamination microbiologique et chimique supérieure aux limites de qualité retenues pour l'eau potable distribuée par le réseau public.* » Que se passe-t-il donc entre les nuages et le sol ? En soi, l'eau de pluie est une eau qui s'est évaporée puis recondensée. Mais l'air contient des gaz issus du milieu naturel, des activités industrielles, de la combustion des produits fossiles. Gaz qui se dissolvent dans la vapeur d'eau et se transforment en acides. La qualité de l'eau de pluie varie donc d'une région à l'autre. Au nord-est de l'hexagone, plus industrialisé, l'acidité est plus importante, alors que sur les façades maritimes, on relève des pH proches de la neutralité. Les pluies acides détruisent les forêts, exacerbent l'érosion des sols et abîment les monuments en pierre calcaire. En 1995, le seuil critique d'acidification en Europe avait touché 115 millions d'hectares de sols forestiers. Depuis, des mesures ont été prises comme l'utilisation de fuels et de gaz mieux désoufrés et la part de forêts affectées décroît : de 23 % en 2000, elle devrait passer à 13 % en 2020. Pour la France, Météo France a suivi la composition chimique des précipitations de 1977 à 2009 sur trois stations du réseau. Source d'acidité, les dépôts de sulfates ont bien diminué. En revanche, les dépôts moyens de nitrates et d'ammonium, responsables de l'eutrophisation (1) des écosystèmes, restent stables. Toutefois, sur la période étudiée, l'acidité baisse et s'approche partout du niveau que l'on devrait naturellement trouver dans les eaux de pluie.

S. B.

AFP/PHOTONONSTOP/FREDERIC SOREAU

1. Asphyxie des écosystèmes aquatiques liée en général à un apport exagéré de substances nutritives.

Minérales… mais pas toujours potables !

SANTÉ. Qu'arriverait-il à une personne qui ne boirait toute sa vie qu'une seule eau minérale ? A vrai dire, on l'ignore. Mais les médecins recommandent d'utiliser de préférence des eaux peu minéralisées et de varier les marques. Car on oublie parfois que certaines d'entre elles, si elles ne sont pas impropres à la consommation, ne sont pas… potables. En France, une eau ne peut être qualifiée de minérale que si elle est reconnue comme bénéfique pour l'organisme par l'Académie de médecine et le ministère de la Santé. D'origine profonde, elle ne peut être traitée, et sa composition physico-chimique doit rester stable dans le temps. C'est justement sa teneur en minéraux qui peut dépasser largement certains critères de potabilité. Pas de limite officielle pour les taux de salinité, souvent importants. En revanche, la célèbre eau de Vichy a longtemps affiché une teneur en fluor de 9 mg/litre… Six fois supérieure à la valeur-guide ! Elle indique aujourd'hui sur ses bouteilles 1 mg/litre. La Contrex a trop de magnésium : 80 mg/litre. Aucune eau du robinet présentant un tel taux ne pourrait être distribuée. Cette dernière est très contrôlée, et des mesures sont instaurées dès qu'elle ne remplit plus les critères pour satisfaire aux normes de potabilité (1). Quant à sa composition, elle se rapproche le plus souvent de celle d'une eau faiblement minéralisée !

S. B.

DR

1. La dernière enquête de l'UFC Que choisir (20 mars 2012) indique que 97,5 % des Français bénéficient toute l'année d'une eau de bonne qualité.

« Un chaos généré par le mélange des eaux »

Interview. Dès 1600 avant notre ère circulent en Mésopotamie des versions du mythe du Déluge. Toutes évoquent la restauration d'un ordre du monde ébranlé par la révolte des hommes, et leur soumission définitive aux dieux.

AFP/MANUEL COHEN

JEAN-JACQUES GLASSNER
assyriologue, directeur de recherche émérite au CNRS, Histoire et archéologie de l'Orient cunéiforme (Haroc), professeur à l'Ecole des hautes études en sciences sociales.

L'un des plus célèbres mythes de l'eau est celui du Déluge. Comment est-il parvenu jusqu'à nous ?

On a d'abord connu ce récit par la Bible avant qu'il ne soit découvert au XIXe siècle, inscrit sur des tablettes d'argile mises au jour du côté de l'actuelle Mossoul (Irak), l'ancienne Ninive, en Mésopotamie. Ce « pays d'entre les deux fleuves » des Grecs, territoire compris entre le Tigre et l'Euphrate. Ces tablettes remontent au XVIIe siècle avant notre ère, soit 1600 avant J.-C. ! Dix siècles plus tard, des éléments de ce même récit figurent dans une édition de l'*Epopée de Gilgamesh* (1) réalisée pour la bibliothèque royale fondée par Assurbanipal (2) à Ninive, en Assyrie. Une preuve de l'extraordinaire longévité de ce texte.

Quelle est l'origine de ces écrits ?

Le récit du Déluge est un mythe akkadien (3) composé à partir d'éléments issus de plusieurs traditions, dont certaines sumériennes (4). Mais il existe en fait deux grandes compositions littéraires de ce mythe. La première, le *Mythe d'Atrahasis* – le « super sage » dont le nom signifie « Sceptre d'ingéniosité » –, est connue grâce à la copie babylonienne du XVIIe siècle évoquée plus haut.

Que nous apprend-il ?

Je dirai que le *Mythe d'Atrahasis* est l'histoire d'une jacquerie ! La révolte de petits dieux lassés de travailler pour des grands dieux qui, eux, ne font rien. Après avoir jeté leurs outils, cessé de nourrir les démiurges pour mieux assiéger leurs palais, les dieux de second ordre vont finalement être acceptés et accueillis par les dieux supérieurs. Mais un problème de taille se pose très rapidement : plus personne ne travaille pour produire de la nourriture. L'ensemble des dieux se réunit donc et décide d'inventer l'homme… lequel se met immédiatement à l'ouvrage. Or les humains se multiplient à une telle cadence que les divinités ne peuvent plus dormir ! Excédées par le vacarme, elles décident ni plus ni moins de ●●●

Le mythe du Déluge consigné dans la Bible est postérieur de plusieurs siècles aux écrits mésopotamiens. L'arche de Noé, manuscrit allemand, vers 1375.

THE GRANGER COLLECTION NYC/RUE DES ARCHIVES - AKG IMAGES

+ *« Désastres », Cahiers d'anthropologie sociale* n° 7, 2011, L'Herne

Tablette relatant le mythe du Déluge rédigée au VII[e] siècle av. J.-C. pour la bibliothèque royale d'Assurbanipal.

THE GRANGER COLLECTION NYC/RUE DES ARCHIVES

●●● supprimer les hommes. Les dieux vont alors les frapper d'une succession de fléaux : des épidémies et toutes sortes de maladies. Mais rien n'y fait. Les hommes résistent. C'est là que le grand dieu Enlil (5) fait le choix de noyer l'humanité sous un déluge, l'envoyant tout entière à la mort. Dans ce récit, après avoir construit un bateau qui devra être hermétiquement clos, un « unique » personnage, très dévot, est sauvé. Un dénommé Atrahasis. Il se réfugie dans sa nef avec ses biens et quelques animaux. Le Déluge va durer sept jours et sept nuits. Le mythe, qui est surtout celui de la création de l'homme et des premiers temps de l'humanité, s'achève sur des mesures de protection contre la surpopulation : il existera des femmes infécondes, de la mortalité infantile et des interdits liés à la procréation.

Que raconte le second récit ?

Il s'agit de celui figurant dans la onzième des douze tablettes de l'*Epopée de Gilgamesh*. Un récit de 3000 vers, retrouvé dans les ruines du palais de Ninive. Il y est clairement fait référence à l'épisode du Déluge. Ce fragment de tablette d'argile, présenté le 3 décembre 1872 devant les membres de la Société d'archéologie biblique, à Londres, prouvait qu'un texte antérieur de plusieurs siècles au récit biblique racontait une histoire en tout point identique à celle du Déluge de l'Ancien Testament. A l'époque, l'affaire a fait grand bruit ! Le texte concerne un certain Utanapishti (ou Uta-Napishti). Un Babylonien qui a pu être sauvé après qu'Ea, le dieu de la Sagesse, lui a ordonné de *« démolir sa maison pour se faire un bateau »*. Une différence de taille existe toutefois entre cette version et celle d'Atrahasis. Dans cet exemple-là, l'homme n'est pas seul à avoir pu réchapper du Déluge. Son épouse et une suite nombreuse l'ont accompagné dans la nef, en plus de tous les couples d'animaux présents sur terre, dans les eaux et dans le ciel. C'est exactement le récit qui figure dans la Bible, avec davantage de détails.

Cette fois encore, il est question d'une « arche »…

Un bateau tout à fait fascinant par ailleurs… Dans le récit d'Atrahasis, l'embarcation est petite et en forme de couffin. Un couvercle permet de la fermer de l'intérieur. Entièrement calfatée, la minuscule nacelle va voguer sur les eaux comme un ballot hermétiquement clos. Quant au second bateau, celui d'Utanapishti, on en possède les dimensions très précises. Long de 90 mètres, il est subdivisé en sept étages, eux-mêmes séparés en neuf compartiments… Cette descrip-

RAZ-DE-MARÉE EN MER DE MARMARA

Un événement géologique majeur peut-il avoir été à l'origine du mythe du Déluge ? C'est la question – toujours d'actualité – que se posent de nombreux spécialistes depuis la fin des années 1990, et notamment les géologues américains William Ryan et Walter Pitman, de l'université de Columbia (Etats-Unis). Selon eux, un bouleversement intervenu il y a 7500 ans du côté de la mer Noire pourrait être à la source des récits mésopotamiens.

« Mémorisé, amplifié, et transmis oralement pendant des millénaires, le traumatisme d'un cataclysme exceptionnel peut tout à fait avoir servi de substrat à l'édification d'un mythe », **reconnaît l'assyriologue Jean-Jacques Glassner (CNRS).**

Le récit de Gilgamesh, incisé dans l'argile vers 2600 ans av. J.-C., pourrait-il être l'écho d'un tel événement ? Pour les tenants de cette hypothèse, il y a 9000 ans, la mer Noire était un lac d'eau douce situé 100 mètres plus bas que la mer de Marmara et la Méditerranée. A la suite d'une catastrophe – la région est fréquemment victime d'accidents telluriques –, l'ouverture soudaine du Bosphore aurait entraîné sa submersion et les eaux salées de la Méditerranée s'y seraient déversées. Un bouleversement à relier à la montée du niveau des mers, qui a débuté à la fin de la dernière glaciation, il y a 11 000 ans. Traces encore visibles de ce cataclysme, les vestiges paléoclimatiques et restes de faune d'eau douce régulièrement remontés des sédiments profonds de la mer Noire, lors d'opérations de carottage.

tion correspond en fait à la représentation que les anciens Mésopotamiens se faisaient du cosmos. Un cube divisé en sept niveaux. Trois niveaux célestes, trois niveaux terrestres, et un niveau souterrain pour les morts. Ces visions du cosmos ont évidemment évolué au cours du temps. Quand les Mésopotamiens ont commencé à se mettre à l'astronomie et au calcul, l'idée de la sphère est apparue. La Terre est ainsi devenue un cercle. Le cube a disparu au profit de représentations du monde concentriques, où a néanmoins été conservée la division en sept niveaux.

Nous sommes donc face à une représentation cosmographique ?

En effet. Ces mesures ne correspondent pas seulement à celles de l'arche décrite dans l'*Epopée de Gilgamesh*, mais aussi aux dimensions de la tour de Babel ! La tour de Babylone ! Tour qui n'est autre que le pilier, le mât central permettant à l'arche de tenir debout pour maintenir le cosmos. L'arche est une représentation du microcosme.

Dans l'*Epopée de Gilgamesh*, il est question d'une fin du Déluge identique à celle reprise dans la Bible…

Utanapishti attend en effet que les eaux baissent pour envoyer successivement hors du bateau une colombe, une hirondelle et un corbeau. Or ce dernier ne revient pas, ayant trouvé un endroit où se poser. Utanapishti peut donc sortir de son navire et libérer les animaux qui l'accompagnent. Mais ce vol de l'oiseau signale surtout le rétablissement de l'ordre cosmique, avec la restauration de la ligne d'horizon après que l'ordre vertical du monde a été détruit par le chaos généré par le mélange des eaux d'en haut et d'en bas. D'autre part, Utanapishti a offert un sacrifice au démiurge pour le remercier d'avoir survécu ainsi que les siens. Ce faisant, il a surtout rétabli l'homme dans ses fonctions de serviteur des dieux. Les hommes d'avant avaient péché contre les dieux. Utanapishti est l'initiateur d'un monde nouveau. La relation verticale fondamentale a été restaurée et retrouvée.

Existe-il d'autres récits de déluges dans la littérature mésopotamienne ?

Il existe un autre mythe sumérien du IIe millénaire avant notre ère, connu sous le nom de *Mythe d'Inanna (6) et Shukaletuda*. Ce dernier est le jardinier des dieux. C'est lui qui crée le « premier jardin », dont il arrose évidemment les plantes. Jusqu'au jour où il viole Inanna pendant son sommeil. La déesse, dont la virginité vient d'être perdue, se met alors à produire du sang à la place de l'eau. Le jardin dépérit… La stérilité et la sécheresse envahissent le pays. D'autres récits se sont développés, à l'instar du *Mythe d'Atrahasis*, autour de l'idée d'une humanité inquiétante pour les dieux. Par leur nombre, les hommes pourraient se révolter contre eux. C'est le cas du *Mythe d'Erra*, un poème composé à Babylone au début du Ier millénaire avant notre ère. Il y est encore question de la jonction entre les eaux du ciel et de la terre, qui montent pour dévaster la terre en l'inondant.

Le thème du Déluge est donc récurrent…

Depuis des temps très anciens, dans ce pays d'entre les deux fleuves, où de puissants cours d'eau étaient prompts à se déchaîner et à entraîner des crues spectaculaires, les histoires d'eau et de déluges ont alimenté l'imaginaire des peuples. Il n'est sans doute pas étonnant que ces récits trouvent leurs origines dans cette région du monde.

PROPOS RECUEILLIS PAR BERNADETTE ARNAUD

> “ Violée par le jardinier des dieux, Inanna, déesse de la Fertilité, se mit à produire du sang

LA CHUTE DU SERPENT ARC-EN-CIEL

Chez les aborigènes Warlpiri de Lajamanu, dans les Territoires du Nord (Australie), de nombreuses histoires tournent autour de l'eau. L'une des plus importantes concerne le « rêve Pluie-Eau ». Elle a trait au Serpent Arc-en-Ciel, Warnayarra, l'être mythologique majeur de ces populations dont la culture est l'une des plus anciennes du monde. Associé à la Voie lactée, le Serpent Arc-en-Ciel contrôle l'eau, la source de vie la plus précieuse. Selon ce récit, sa chute sur Terre aurait déclenché pluies et inondations.

Ce grand mythe est décrit dans le Temps du Rêve, ou *jukurrpa* en warlpiri, une expression qui désigne tout autant les êtres ancestraux eux-mêmes, les noms ou totems qui leur sont associés, que les récits mythiques. *« Ce "Temps du Rêve", ou "dreamings" des Australiens, a souvent été compris comme un temps lié aux origines du monde, alors que les mythes aborigènes concernent des mouvements de transformation et agissent surtout dans le présent*, explique l'ethnologue Barbara Glowczewski, du laboratoire d'Anthropologie sociale (LAS) du Collège de France, directrice de recherche au CNRS. *Les êtres ancestraux, sous la forme de principes actifs, participent au devenir des choses. Tous les sites sacrés que les Aborigènes défendent aujourd'hui sont pour eux les traces, les empreintes ou les métamorphoses du corps de ces voyageurs aux formes hybrides qui sillonnaient la terre avant l'apparition des hommes. »* **Des sites qui dessinent les parcours mythiques des ancêtres. Ainsi en est-il pour le maître de l'eau tout au long de l'itinéraire du Rêve Pluie-Eau.**

CHARLES ET JOSETTE LENARS/CORBIS

Le Serpent Arc-en-Ciel, peinture sur écorce, Terre d'Arnhem, Territoires du Nord (Australie).

1. Gilgamesh : souverain de la cité sumérienne d'Uruk, il a régné vers 2650 av. J.-C. Il est le personnage principal de plusieurs récits épiques, dont l'*Epopée de Gilgamesh*.
2. Assurbanipal ou Ashurbanipal, roi de 669 à 627 av. J.-C, fut le dernier grand roi de l'Assyrie antique.
3. Akkadiens : populations du nord de la Mésopotamie ou haute Mésopotamie. Leur langue est liée à la grande famille des langues sémitiques.
4. Sumériens : habitants de la Mésopotamie méridionale ou basse Mésopotamie, inventeurs de l'écriture cunéiforme vers 3300 av. J.-C.
5. Enlil : dieu du Ciel à Sumer.
6. Inanna : nom sumérien d'Isthar (akkadien), déesse de la Fertilité, la plus importante divinité féminine du panthéon mésopotamien.

DVD

Quand le décor passe au premier plan

Des abysses vertigineux aux grands espaces de l'Ouest, la nature se fait parfois protagoniste pour offrir à l'homme des défis à la démesure des éléments.

La terre, le vent, le ciel… De tous les genres cinématographiques, aucun n'a autant exalté les éléments que le western. De John Ford à l'immense *Little Big Man* d'Arthur Penn (1970), il a magnifié les grands espaces, l'ocre rouge de l'Ouest sauvage, les tempêtes, les torrents, le feu du soleil, des armes et des incendies… Pour son second western en tant que metteur en scène, Clint Eastwood rend un très bel hommage aux *natives* dans *Josey Wales hors-la-loi* (1976), parcours initiatique et naturaliste d'un fermier du Missouri vers les terres de ses frères Rouges. Un traitement hyperréaliste de l'histoire américaine, d'après le magnifique scénario de Philip Kaufman, qui commença le tournage.

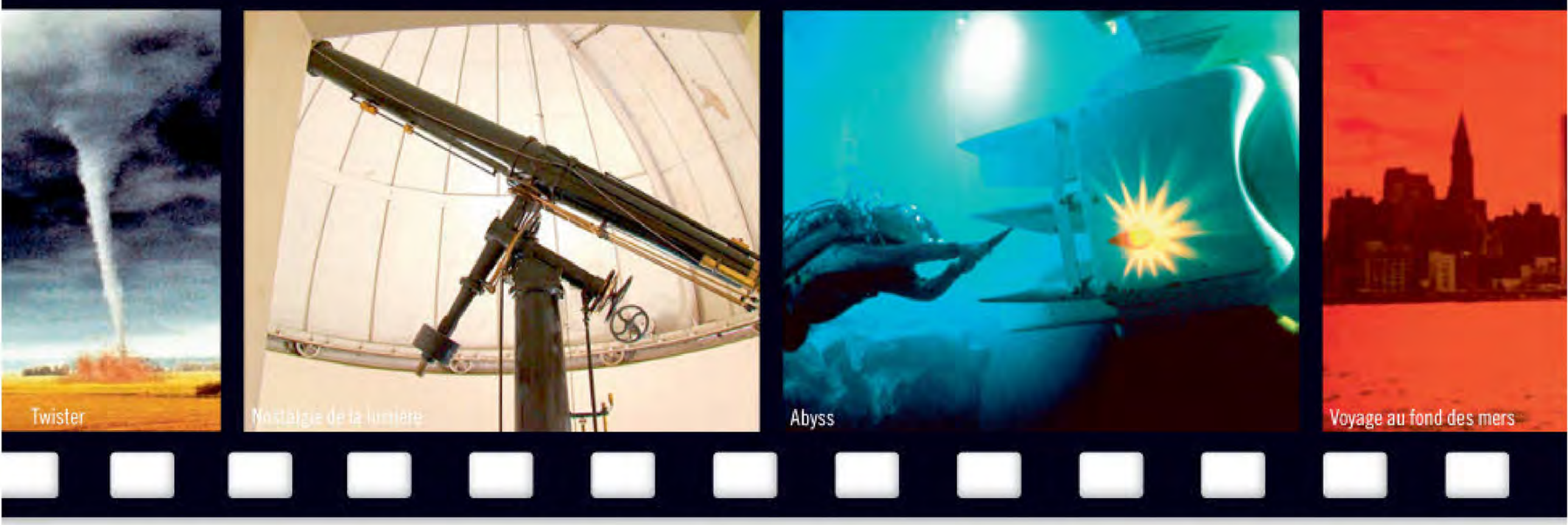
En 1990, *Danse avec les loups* est un coup de tonnerre. Le premier long-métrage de Kevin Costner réalisateur est *le* film de sa carrière. Un western pro-Indiens, poignant et excellemment mis en scène par un débutant qui réussit la performance de nous faire percevoir le point de vue de l'autre, du « sauvage ». La vie au milieu de cette tribu indienne en harmonie avec les éléments est délicate et touchante.

Mais, de tous les westerns, celui qui célèbre le mieux la nature est sans doute l'œuvre magistrale de Sydney Pollack, *Jeremiah Johnson*, en 1972. A la fin du XIXe siècle, un jeune homme (Robert Redford, superbe), fatigué par la civilisation, se retire dans les montagnes pour y vivre comme un animal, comme un trappeur. Il affronte des températures extrêmes, la solitude, la nature dans toute sa force. Lui aussi croise la piste des Indiens. Cette ode somptueuse est une quête sublimée par une réalisation inspirée. Là encore, les paysages tiennent le premier rôle.

La densité de l'air

Déclinaison atypique du film catastrophe, *Twister* raconte en 1996 la vie aventureuse d'un groupe de chercheurs, fondus de cyclones, dans la fameuse « allée des tornades », au centre des Etats-Unis, sur un scénario de Michael Crichton – action soutenue et psychologie sommaire, donc. Persuadés que c'est en implantant des capteurs au cœur du vortex qu'ils récolteront le plus de données, les scientifiques se mettent en chasse de toute tornade pour l'approcher au plus près, voire la pénétrer…

Dans un tout autre genre, *Nostalgie de la lumière*, de Patricio Guzmán, a surgi comme un ovni cinématographique. Depuis près de trente



ans, des femmes arpentent l'Atacama – plus faible densité d'activité organique sur Terre, il y pleut deux à quatre fois… par siècle –, à la recherche des ossements de leurs proches, torturés par la dictature chilienne. Dans ce même désert sont implantés des dizaines de télescopes, oreilles géantes tendues vers l'ailleurs. Les unes cherchent des corps, les autres des corps célestes. Primitive et futuriste, politique et poétique, cette œuvre magnifique révèle la densité de l'air, ces *« poussières d'étoiles »* chères à Hubert Reeves.

Créature d'eau

Au milieu des années 1960, une série télé a fait rêver une génération d'enfants et d'adolescents, et sans doute suscité bien des passions pour le monde sous-marin. Avec son bip de sonar entêtant, *Voyage au fond des mers* a marqué les esprits. Pour endiguer la surpopulation, des chercheurs étudient les potentialités de la vie subaquatique à l'aide d'un sous-marin atomique expérimental. Mais, en pleine guerre froide, la collaboration américano-soviétique n'est pas chose aisée… Imaginée par Irwin Allen, la série mélange allègrement Jules Verne et H.G. Wells, *Moby Dick* et les soucoupes volantes. S'ils paraissent aujourd'hui désuets, décors et navires étaient furieusement futuristes. A l'époque, pas d'images de synthèse : les effets spéciaux reposent sur les maquettes.

Tourné dans la cheminée immergée d'une centrale nucléaire, *Abyss*, de James Cameron, est devenu, lui, un classique incontournable. Le film sorti en 1989 comporte deux scènes inoubliables : la créature d'eau, réalisée grâce à un tout nouvel effet spécial, et le moment où l'un des personnages emplit ses poumons d'un étrange et luminescent liquide – sujet sur lequel les militaires américains et suédois ont beaucoup travaillé…
Waterworld est lancé six ans plus tard avec de gros moyens. La mise en scène de ce blockbuster futuriste est confiée à Kevin Reynolds qui, à défaut d'être un réalisateur inspiré, est un briscard hollywoodien expérimenté. Les amateurs de science-fiction trépignent à l'idée de découvrir ce nouveau monde gagné par l'océan primaire. Les glaces des pôles ont entièrement fondu. Les survivants ont trouvé refuge sur des structures flottantes, et les trafics vont bon train. Pourtant, *Waterworld* est une immense déception. Cet interminable *road movie* aquatique révèle un scénario faiblard. Il est sauvé du naufrage par la superbe séquence finale où l'on découvre, engloutis, les restes du monde oublié : le monde d'avant.

La flamme perdue

Les tout premiers feux étaient ceux du tonnerre et des volcans. Classique parmi les classiques, *Le Pic de Dante* incarne le savoir-faire hollywoodien, et ses limites. Effets spéciaux impressionnants, distribution impeccable, mais scénario familial ultra prévisible. Un volcanologue (Pierce Brosnan) détecte des manifestations sismiques sur les pentes d'un volcan endormi. Convaincu que ces manifestations telluriques annoncent le réveil imminent du monstre assoupi, il alerte les autorités. Seule madame le maire (Linda Hamilton) de la bourgade touristique voisine, sensible au charme du chercheur, le prend au sérieux…
Autrement plus passionnant, *La Guerre du feu* est un monument du cinéma. Le chef-d'œuvre de Jean-Jacques Annaud, sorti en 1981, impressionne aujourd'hui encore. Cette fresque préhistorique raconte les balbutiements de la civilisation, il y a 75000 ans. Une œuvre convaincante qui raconte l'histoire d'une tribu de pré-*sapiens* sachant conserver le feu, mais incapable de le créer. Alors, quand cette tribu perd accidentellement la flamme, elle envoie ses trois meilleurs guerriers chercher l'élément magique, vénéré mais redouté. Sa survie en dépend. Le plus impressionnant film de fiction préhistorique est un formidable défi dont l'un des tours de force réside en son écriture. Sans un mot, Jean-Jacques Annaud réussit à tenir en haleine le spectateur pendant 96 minutes, avec un vrai scénario (signé Gérard Brach, d'après le roman de J. H. Rosny), une véritable dramaturgie et des personnages attachants. Cette œuvre majeure a d'ailleurs relégué les documentaires scientifiques de l'époque au rang d'incongruités désuètes – ils devront attendre l'ère du numérique pour s'en remettre ! L'image impeccable du DVD – mieux, du Blu-ray – restitue la qualité de la photographie, le travail de maquillage, le jeu des acteurs et l'immensité des plans larges. Une fois n'est pas coutume, les bonus sont passionnants : Jean-Jacques Annaud y commente un *making of* rapportant trois années de recherches linguistiques, gestuelles et comportementales. La reconstitution ethnologique a bénéficié de l'aide de l'écrivain Anthony Burgess, qui a « inventé » le langage de l'époque. **YVES BLANC**

1 ET 5 COLLECTION CHRISTOPHEL. - 2 ET 3 AFP. - PICTURE DESK

Twister
Jan de Bont
(E.-U., 1996)
DVD Universal

Nostalgie de la lumière
Patricio Guzmán
(Chili/France/
Allemagne/
Espagne, 2010)
DVD Pyramide

Abyss
James Cameron
(E.-U., 1989)
DVD Fox

Voyage au fond des mers
Série créée par
Irwin Allen (E.-U.,
1964-1968)
coffret 4 DVD
Universal

Brèves de labo et autres confidences moléculaires

Révélés, manipulés, disséqués, combinés, les éléments n'ont pas fini d'affoler les chimistes. Sélection d'ouvrages qui font parler la matière avec intelligence.

Histoire d'O

La découverte de l'oxygène au XVIIIe siècle par le Français Lavoisier a sonné comme un coup de tonnerre dans l'histoire des sciences. Cet élément allait devenir le pilier d'une nouvelle discipline, la chimie. Il n'en fallait pas moins pour évincer la théorie millénaire des quatre éléments ! Des alchimistes, philosophes du feu passés maîtres dans l'art de la distillation, jusqu'à la formulation atomique de l'oxygène en O_2, cet ouvrage captivant, accessible à tous, retrace l'histoire d'une science naissante portée par la passion d'une poignée de savants. Une aventure humaine touchante, mais aussi un intense affrontement académique. F. F.

Histoire de l'oxygène. De l'alchimie à la chimie, Gérard Borvon, Vuibert, 2012, 224 p., 26 €

La chimie sera verte ou ne sera pas !

« Le temps du monde fini commence. » Ces quelques mots de Paul Valéry placés en exergue de l'ouvrage en donnent le ton. Ils résonnent d'autant plus aujourd'hui que nous courons vers l'épuisement des ressources fossiles, au rythme effréné d'une démographie galopante ! Sous le nom de « chimie verte », Stéphane Sarrade, chercheur au CEA, présente ici la révolution d'une industrie chimique en recherche de solutions durables. Les plantes y font office d'éponges pour récupérer les métaux rares dans les décharges et les substances médicamenteuses y sont cultivées par modification génétique des micro-organismes… Un essai résolument optimiste, qui prend position sur les biocarburants, le nucléaire, les OGM, etc. F.F.

La Chimie d'une planète durable, Stéphane Sarrade, Le Pommier, 2011, 227 p., 21 €

La grande saga des éléments

De la contemplation fascinée de l'austère table périodique de Mendeleïev, Sam Kean, journaliste qui travaille notamment pour *le New Scientist*, a tiré une saga, celle des actions et réactions des éléments, stars comme l'hydrogène ou brebis galeuses comme le germanium. Il raconte avant tout, à travers des anecdotes cocasses ou tragiques, la vie de ceux qui les ont découverts ou transformés. Sur un rythme haletant, on découvre ainsi la drôle d'histoire du kilogramme qui rétrécit, comment les traceurs radioactifs ont été expérimentés pour la première fois dans du ragoût à des fins policières, ou encore que, sans iode, l'âme n'existerait pas. On croise Platon, Goethe ou Fermi, et l'on s'amuse de prendre conscience du rôle crucial et insoupçonné des atomes dans la politique, la médecine ou l'art. F. L.

Guerres et paix chez les atomes. L'histoire du monde racontée à travers la table périodique des éléments, Sam Kean, JC Lattès, 2011, 444 p., 23,50 €

Tous à vos blouses !

Lorsque la chimie revêt son costume de magicienne, la matière se met à danser, exploser et prendre des formes surprenantes. A travers une cinquantaine d'expériences spectaculaires, cet ouvrage nous invite à découvrir les propriétés et réactions chimiques qui animent la vie trépidante des molécules. Le parcours, proposé par Paul Depovere, professeur de chimie à l'université de Louvain, est ponctué d'anecdotes et de quiz qui engagent à une certaine gymnastique des neurones. Avec les précautions d'usage, vous observerez un métal fondre dans votre main et un liquide bouillir tout en gelant. Vous allumerez une bougie avec un glaçon et enflammerez des billets sans qu'ils brûlent. Ces expériences sont une introduction ludique aux grands principes et lois de la chimie. F. F.

Oh, la chimie ! Quiz, tours de magie et autres anecdotes chimiques extraordinaires, Paul Depovere, Dunod, 2008, 238 p., 19,90 €

Portrait sensible du maître des paillasses

Héraut de la gastronomie moléculaire, Hervé This place ici sous son microscope le chimiste et ses méthodes. Scrutant l'humain d'hier et d'aujourd'hui en son laboratoire, il le révèle artiste magicien des molécules, sensuel expérimentateur d'odeurs et de textures, intellectuel vivant une vie cachée, celle de l'esprit qui seul peut « voir » les atomes et réfléchir aux conséquences de leurs manipulations. Il le montre surtout amoureux, toujours à la recherche de la beauté de la matière et à l'affût de ses détours imprévus. Mais au fait, les molécules existent-elles vraiment ? F. L.

La Sagesse du chimiste, Hervé This, Jean-Claude Béhar, 2009, 131 p. 13,70 €

PAGE RÉALISÉE PAR FRANÇOIS FOLLIET ET FLORENCE LEROY

POUR LES LECTEURS DE SCIENCES ET AVENIR

3 romans policiers à lire absolument !

Une sélection exclusive en format poche de 3 des meilleurs auteurs de polars

24,40€ les 3 livres
Frais d'envoi OFFERTS

POUR COMMANDER : L'OBJET DU MOIS 01.40.26.86.10 www.objetdumois.com

L'OBJET du mois
www.objetdumois.com

BON DE COMMANDE

A renvoyer avec votre règlement sous l'enveloppe affranchie à : L'OBJET DU MOIS - 18, rue Couste - 94230 CACHAN

	Référence	Qté	Prix	TOTAL
3 ROMANS POLICIERS	T197-11623		24,40€	€
FRAIS D'ENVOI			~~5,00€~~	OFFERTS
TOTAL DE MA COMMANDE				€

• Délai de livraison : 2 semaines • Offre valable en France métropolitaine • Dom-Tom et étranger : nous consulter.

RÈGLEMENT

❑ Je règle par CHÈQUE à l'ordre de : l'Objet du Mois

❑ Je règle par CARTE BANCAIRE

N° : |_|_|_| |_|_|_| |_|_|_| |_|_|_|

Notez les 3 chiffres du cryptogramme au dos de votre carte : |_|_|_|

Date d'expiration : |_|_|_|

Signature obligatoire :

ADRESSE DE LIVRAISON

Nom : _____ Prénom : _____

Adresse : _____

Code Postal : |_|_|_|_|_| Ville : _____

En indiquant mon adresse email ci-dessous, je serai informé(e) des offres commerciales de l'Objet du Mois et de ses partenaires :

_____ @ _____

172H-A37
E1

Conformément à la loi Informatique et Libertés du 06/01/1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant.

Le futur est de retour.

Le tour du monde des musiques novatrices
Brian Eno, David Lynch, Arvo Pärt, Tamikrest, Tony Allen,
la nouvelle electronica russe …

dès le 26 septembre
chez les meilleurs disquaires de la planète
et sur RTS.ch/boutique

laplanetebleue.com

SCIENCES ET AVENIR

COUL EUR 3 RTS